

Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme am Beispiel eines DMD-Scheinwerfers

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
**Dipl.-Ing.
Peer-Phillip Ley**

2021

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
 2. Referent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
- Tag der Promotion: 17. Juni 2021

Für meine Eltern, Gabriele und Wilfried

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH) entstanden.

Einen besonderen Dank möchte ich Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer für die wissenschaftliche Betreuung, den vertrauensvollen Umgang und die konstruktiven Anregungen aussprechen, die wesentlich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben. Weiterhin möchte ich mich ganz herzlich bei Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für die Übernahme des Koreferats und Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Ferner möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die wundervolle und interessante Institutszeit bedanken, in der über die Arbeitszeit hinaus tiefgreifende Freundschaften entstanden sind. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Alexander Wolf und Gerolf Kloppenburg die mich insbesondere in meiner Anfangszeit am Institut durch ihre fachliche Expertise im Bereich der Optomechatronik geprägt haben. Meinen Kollegen Marvin Knöchelmann und Paul Christoph Gembarski danke ich für die gehaltvollen Diskussionen im Hinblick auf die Notwendigkeit neuer Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme, welche erheblich zur Präzisierung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein Teil dieser Arbeit ist im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Konzernforschung der Volkswagen AG entstanden, weshalb ich mich unter anderem bei Dr. rer. nat. Nils Pfullmann bedanken möchte.

Ganz herzlich möchte ich mich auch bei meinen Eltern für die bedingungslose Unterstützung in allen Lebensphasen sowie der kontinuierliche Motivation bedanken. Ich danke ebenfalls meiner lieben Frau für die aufbauenden Worte und den uneingeschränkten Rückhalt in dieser intensiven Lebensphase.

Peer-Phillip Ley

Hannover, im Juni 2021

Kurzfassung

Bei der Entwicklung hochauflösender Lichtsysteme werden in den Phasen des Konzipierens und Entwerfens auf Grundlage verschiedenster Anforderungen erfolgsbestimmende Entscheidungen getroffen. Für die Entwicklung einfacher Lichtsysteme, die aus einer Lichtquelle und einem optischen Element zur Strahlformung oder -ablenkung aufgebaut sind, können die zu treffenden Entscheidungen noch gut beherrscht werden. Mit zunehmender Komplexität der Lichtsysteme, beispielsweise durch die Verwendung von Lichtmodulatoren und dem Einsatz mehrere optischer Elemente, erfordert die Entscheidungsfindung ein methodisches Vorgehen, um unüberwindbaren Diskrepanz zwischen Entwicklungszielen und -ergebnissen zu vermeiden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme erarbeitet und an einem Beispiel angewendet. Unter Berücksichtigung der Étendue als Erhaltungsgröße in optischen Systemen wird durch die logische Verknüpfung spezifischer Schritte ein planmäßiges und zielorientiertes Vorgehen zum Konzipieren bereitgestellt. Hierbei werden Technologien zur Lichtmodulation und -erzeugung, die räumliche Anordnung optischer Elemente für Systemarchitekturen und Strategien zur Beleuchtung des Lichtmodulators sowie dem auszuleuchtenden Bereich für die Anwendung spezifiziert. Im letzten Schritt wird ein Strahlenmodell als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf erarbeitet.

Das methodische Vorgehen zum Entwerfen erfolgt unter Berücksichtigung der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung. Durch Festlegen von Lichtquelleneigenschaften, Funktionsflächen und Randbedingungen wird der sequentielle Optikentwurf mithilfe von Entwurfszielen, welche in einer *Merit Function* (dt. Bewertungsfunktion) festgehalten werden, optimiert und für abbildende Systeme hinsichtlich der Anforderungen bewertet. Werden die Anforderungen erfüllt, erfolgt anschließend die Bewertung des Wirkungsgrades sowie die Identifikation von Streulicht im Rahmen der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung.

Die Anwendbarkeit der Methoden erfolgt am Beispiel eines hochauflösenden Scheinwerfers unter Verwendung eines DMDs zur Lichtmodulation und LEDs zur Lichterzeugung. Ausblickend wird unter anderem der Ansatz einer hybriden Strahlverfolgung zum Entwerfen diskutiert.

Schlagwörter: Konzipieren, Entwerfen, hochauflösende Lichtsysteme, LED, DMD

Abstract

Title: Conception and design of high-resolution lighting systems using the example of a DMD headlamp

In the development of high-resolution lighting systems, success-determining decisions are made on the basis of a wide range of requirements during the concept and design phases. For simple lighting systems consisting of one light source and one optical element for beam shaping or deflection, the decisions to be made can still be managed well. However, if the complexity of lighting systems is increased due to the application of technologies for light modulation and the use of multiple optical elements, a methodical approach is required for decision-making in order to avoid insurmountable discrepancies between development goals and results.

In this thesis, methods to conceptualize and design high-resolution lighting systems are developed and applied on an example. Taking into account the Étendue as a conserved quantity in optical systems, a systematic and target-oriented approach to conceptualize optical systems is provided due to the logical link of specific steps. Here, technologies for light modulation and generation, the spatial arrangement of optical elements for system architectures and strategies to illuminate the light modulator as well as the area to be illuminated for the application are specified. In the last step, a beam model is developed as a basis for the subsequent design.

The design method takes into account sequential and non-sequential ray tracing. By defining light source properties, functional areas and boundary conditions, the sequential optical design is optimized and evaluated for imaging systems with respect to the requirements by means of design targets, which are specified in the Merit Function. If the requirements are met, the evaluation of the optical efficiency as well as the identification of stray light is performed within non-sequential ray tracing.

The applicability of the methods is exemplified by a high-resolution headlamp applying a DMD for light modulation and LEDs for light generation. Looking ahead, the approach of a hybrid ray tracing for the design of optical systems is discussed.

Key words: Conception, design, high-resolution lighting systems, LED, DMD

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Abkürzungen und Formelzeichen	XV
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft	7
2.1 Beleuchtungstechnik	7
2.1.1 Photometrische Größen	8
2.1.2 Étendue	10
2.1.3 Lumineszenzdioden	13
2.1.4 Mikrospiegelarrays	18
2.1.5 Optische Systeme in der Beleuchtungstechnik	21
2.1.6 Strahlengänge in optischen Systemen	26
2.2 Entwerfen optischer Systeme	29
2.2.1 Werkzeuge	29
2.2.2 Methoden	31
2.3 Fahrzeuglichttechnik	40
2.3.1 Lichtverteilungen	40
2.3.2 Hochauflösende Scheinwerfersysteme	42
3 Wissenschaftliche Herausforderungen	47
4 Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme	53
4.1 Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme	53
4.2 Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme	60

5	Konzipieren eines DMD-Scheinwerfers	69
5.1	Anforderungen definieren	70
5.2	Lichtmodulator festlegen	74
5.2.1	Multichip-Konzepte zur Lichtmodulation	74
5.2.2	Einzelchip-Konzept zur Lichtmodulation	76
5.2.3	Auswahl eines DMDs	76
5.3	Lichterzeugung spezifizieren	79
5.3.1	Lichterzeugung auf Basis der additiven Farbmischung	79
5.3.2	Lichterzeugung auf Basis der Lumineszenzkonversion	82
5.3.3	Bewerten und Auswählen eines Lichtquellenkonzepts	85
5.4	Systemarchitektur determinieren	86
5.4.1	Telezentrische Architektur	87
5.4.2	Nicht-telezentrische Architektur	90
5.4.3	Bewerten und Auswählen einer Systemarchitektur	93
5.5	Beleuchtungsstrategie definieren	94
5.5.1	Abbildende Beleuchtungsstrategien	95
5.5.2	Nichtabbildende Beleuchtungsstrategien	98
5.5.3	Bewerten und Auswählen einer Beleuchtungsstrategie	99
5.6	Verzeichnung abstimmen	101
5.7	Lichtstrom- und Étenduefaktor ermitteln sowie Strahlenmodell erstellen	104
6	Entwerfen eines DMD-Scheinwerfers	109
6.1	Sequentieller Entwurf	110
6.1.1	Emissionscharakteristik und -fläche definieren	110
6.1.2	Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen sowie <i>Merit Function</i> erstellen	111
6.1.3	Sequentiellen Entwurf optimieren	112
6.1.4	Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs bewerten	115
6.2	Nicht-sequentieller Entwurf	119
6.2.1	Lichtquelle und nicht-sequentiellen Entwurf aufbauen	119
6.2.2	Strahlverfolgung durchführen und Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs bewerten	125
6.3	Optimierungsschleife	134
6.3.1	Maßnahmen zur Erhöhung des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke	135
6.3.2	Ergebnisse der Optimierung	138

7 Zusammenfassung und Ausblick	141
7.1 Zusammenfassung	141
7.2 Kritische Würdigung	144
7.3 Ausblick	146
Literaturverzeichnis	149
Eigene Veröffentlichungen	167
Verwendete Normen und Richtlinien	171
Anhang	173
A Simulationsergebnisse	173
B Betreute studentische Arbeiten	178

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AFS	Adaptive Frontscheinwerfersysteme
AlGaInP	Aluminiumindiumgalliumphosphide
BI	<i>Bottom Illumination</i>
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CC	<i>Constant Current</i> (Konstantstrom)
CI	<i>Corner Illumination</i>
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMD	<i>Digital Micromirror Device</i>
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i> (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen)
EE	<i>Encircled Energy</i>
FOV	<i>Field of View</i> (Sichtfeld)
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i> (Halbwertsbreite)
GaN	Galliumnitrid
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
IFAL	<i>International Forum on Automotive Lighting</i>
InN	Indiumnitrid
InGaIn	Indiumgalliumnitrid
ISAL	<i>International Symposium on Automotive Lighting</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LCoS	<i>Liquid Crystal on Silicon</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (Lumineszenzdiode)
MTF	Modulationsübertragungsfunktion
PMMA	Polymethylmethacrylat

PWM	Pulsweitenmodulation
PSF	Punktspreizfunktion
RGB	Additive Farbmischung der Farben Rot, Grün und Blau
RMS	<i>Root Mean Square</i> (quadratisches Mittel)
TIR	<i>Total internal reflection</i> (Totalreflexion)
UV	Ultraviolettstrahlung
vHDG	vertikale Hell-Dunkel-Grenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
YAG:Ce	Cerium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat

Lateinische Notation

A	Fläche
A_E	Empfängerfläche
A_O	Fläches eines optischen Elements zur Strahlformung
$A_{\text{Pro Power}}$	Emissionsfläche der Ostar [®] Projection Power LED
A_{Rechteck}	Fläche eines Rechtecks
A_S	Senderfläche
E	Energie
E_{B50L}	Beleuchtungsstärke im Punkt B50L
E_F	Étenduefaktor
E_v	Beleuchtungsstärke
E_{Max}	Maximale Beleuchtungsstärke in 25 m
f	Frequenz
G	Étendue
G_{DLP5531}	Étendue des DLP5531
G_{DLP7000}	Étendue des DLP7000
$G_{\text{DMD},x}$	Étendue eines DMDs in der Raumrichtung x
$G_{\text{DMD},y}$	Étendue eines DMDs in der Raumrichtung y
G_E	Étendue eines Empfängerelements
G_{Ellipse}	Räumliche Étendue einer Ellipse
G_{LM}	Étendue des Lichtmodulators
G_{LQ}	Étendue der Lichtquelle
G_O	Étendue eines optischen Elements zur Strahlformung
G_{Rechteck}	Räumliche Étendue eines Rechtecks

G_S	Étendue eines Senderelements
G_x, G_y	Étendue eines Rechtecks in der Raumrichtung x bzw. y
h	Planck-Konstante
H	Zeilenanzahl eines Mikrospiegelarrays
I_0	Bezugslichtstärke
I_v	Lichtstärke
K_m	Photometrisches Strahlungsäquivalent
K_{Pfeil}	Kontrast der Pfeilprojektion
L_F	Lichtstromfaktor
L_P	Leuchtdichte in der Pfeilprojektion
L_U	Umgebungsleuchtdichte
L_v	Leuchtdichte
l_1	Abstand zwischen Senderelement und optischem Element zur Strahlformung
l_2	Abstand zwischen optischem Element zur Strahlformung und Empfängerelement
l_x, l_y	Kantenlänge eines Rechtecks in der Raumrichtung x bzw. y
n_i	Brechungsindex des umgebenden Mediums
P	Abstand zwischen Mikrospiegeln
r	Abstand
r_x, r_y	Radius einer Ellipse in der Raumrichtung x bzw. y
V	Spaltenanzahl eines Mikrospiegelarrays
$V(\lambda)$	Spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges

Griechische Notation

α_{Grenz}	Grenzwinkel zu Beleuchtung
α_{Kip}	Mikrospiegelkippwinkel
α_{mE}	Maximal nutzbarer Emissionswinkel
α_x, α_y	Kippwinkel in der Raumrichtung x bzw. y
η_L	Wirkungsgrad einer Lichtverteilung
$\eta_{\text{Pro Power}}$	Wirkungsgrad der Ostar [®] Projection Power LED
η_v	Lichtausbeute
λ	Wellenlänge
Φ_v	Lichtstrom

Φ_{Ist}	Ist-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche
Φ_{Soll}	Soll-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche
$\Phi_{e,\lambda}$	Spektraler Strahlungsfluss
π	Kreiszahl
Ω	Raumwinkel
Ω_0	Einheitsraumwinkel
θ	Öffnungswinkel
θ_{Bel}	Beleuchtungswinkel
θ_{E}	Öffnungswinkel eines Empfängerelements
θ_{S}	Öffnungswinkel eines Senderelements
θ_{TIR}	Winkel für Totalreflexion
θ_x, θ_y	Öffnungswinkel in der Raumrichtung x bzw. y

1 Einleitung

Mit der Einführung einzeliger Matrix-LED-Scheinwerfer im Bereich der Fahrzeugfrontbeleuchtung ist 2013 der erste Schritt in Richtung digitaler Lichtverteilungen und neuer Lichtfunktionen erfolgt. Entgegen konventioneller Abblend- und Fernlichtverteilungen lässt sich mit einzeligen Matrix-LED-Scheinwerfern aufgrund der segmentierten Lichtverteilung beispielsweise die Funktion des blendfreien Dauerfernlichts realisieren [BERL14, KALZ16]. Der Umfang an Lichtfunktionen wie Autobahn-, Stadt- und Landstraßenlicht, zur Verbesserung des Komforts und der Sicherheit, lässt sich durch Erhöhung der LED- und Zeilenanzahl steigern [BÖKE15, MAIE15, KALZ16]. Die Erhöhung der LED- und Zeilenanzahl und damit der Auflösung unter Verwendung herkömmlicher LEDs unterliegt jedoch einer bauraumbedingten Grenze. Ein Forschungsansatz diese Grenze zu umgehen ist, in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt "Integrierte μ -strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme" (μ -AFS), untersucht worden. Ergebnis ist ein 4 mm x 4 mm großes Mikropixel LED-Array mit 1.024 individuell ansteuerbaren Mikro-LEDs bzw. Pixeln [GRÖT15]. Basierend auf dem mehrfachen Einsatz dieses Mikropixel LED-Arrays als Lichtquelle sind verschiedene Forschungsscheinwerfer mit Auflösungen von bis zu 4.096 Pixeln realisiert worden [TROM17, ROTH19, HELD20].

Abseits der LED-Technologie werden auch Technologien aus Videoprojektoren wie Flüssigkristallanzeigen (LCDs) oder digitale Mikrospiegelarrays (DMDs) zur Umsetzung hochauflösender Scheinwerfer untersucht. Die wesentlichen Unterschiede zur LED-Technologie liegen in der deutlich höheren Auflösung sowie der ausschließlichen Modulation von Licht. Bedingt durch die höhere Auflösung wird die Realisierung weiterer Lichtfunktionen wie der Projektion von Informationen auf die Straße ermöglicht [KUBI18]. Basierend auf der LCD-Technologie ist, in dem ebenfalls BMBF-geförderten Projekt "Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung" (VoLiFa2020), ein Scheinwerfer mit einer Auflösung von 30.000 Pixeln entwickelt worden [HESS15]. Der notwendige Einsatz polarisierten Lichts zur Beleuchtung der eingesetzten LCDs führt jedoch zu besonderen Herausforderungen bei der Umsetzung effizienter Systeme [HESS15, KÖHL19]. Dies

ist einer der Gründe, weshalb in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten verstärkt die Eignung der DMD-Technologie zur technischen Umsetzung hochauflösender Scheinwerfer untersucht wird [ROSL05, KAUS06, GÜNT10, LEE11, MICH14, BHAK15, UHLE19, HANS19].

Auch am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) der Leibniz Universität Hannover wird an den unterschiedlichen Ansätzen zur technischen Realisierung eines hochauflösenden Scheinwerfers mittels DMD-Technologie geforscht [LEY18b, LEY19b, LEY19c, KNÖC19]. Darüber hinaus werden mit dem in Abbildung 1.1 dargestellten Versuchsträger, mit Zulassung zum öffentlichen Straßenverkehr, physiologische Studien im Hinblick auf die Größe und des Kontrasts zu projizierender Symbole sowie deren Akzeptanz und Wahrnehmbarkeit von Verkehrsteilnehmern durchgeführt [LACH17, RIZV17, RIZV18].



Abbildung 1.1: IPEG-Versuchsträger für hochauflösende Lichtsysteme [LEY17]

Für die Anwendung im Automobil ergeben sich besondere Herausforderungen bei der Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen. Anders als bei Videoprojektoren resultieren neben den Forderungen nach licht- und abbildungsstarken Systemen zusätzlich Forderungen nach hoher elektrischer und optischer Effizienz. Für die Umsetzung lichtstarker Systeme können zur Beleuchtung des DMDs konventionelle Leuchtmittel wie Gasentladungslampen eingesetzt werden. Die hohe elektrische Leistungsaufnahme von Gasentladungslampen widerspricht jedoch der Forderung nach elektrischer Effizienz. Alternativ können Halbleiterlichtquellen, zu denen auch die eingangs vorgestellten LEDs gehören, eingesetzt werden. Im Bereich der Automobilbeleuchtung waren bereits im Jahr 2017 57 % aller eingesetzten Lichtquellen halbleiterbasiert. Bis zum Jahr 2023 wird dieser Anteil voraussichtlich auf bis zu 85 % steigen [YOLE18]. Ein wesentlicher Grund für den vermehrten Einsatz von LEDs zur Lichterzeugung ist die hohe Lichtausbeute, welche in den kommenden Jahren für weiße LEDs auf bis zu $255 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ prognostiziert wird [PATT18].

Die optische Effizienz und Abbildungsqualität wird maßgeblich durch Vorgehen und Entscheidungen in der Konzipierungs- und Entwurfsphase des hochauflösenden Lichtsystems beeinflusst. Auf Grundlage von Anforderungen an das System sind im Rahmen des Konzipierens zunächst die Eignung eines DMDs sowie einer Lichtquelle zur Umsetzung zu klären. Darüber hinaus müssen optische Elemente zur Strahlformung und -ablenkung des Lichts sowie die Strategie zur Beleuchtung des DMDs und des Verkehrsraums festgelegt werden. Gleichzeitig ist die Systemarchitektur, also die räumliche Anordnung aller Elemente im optischen System, zu definieren. Während der Klärung dieser Schritte ist über die gesamte Konzipierungsphase hinweg die Étendue als Erhaltungsgröße in optischen Systemen zu berücksichtigen. In der anschließenden Entwurfsphase erfolgt unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Werkzeuge der Entwurf des Optikkonzepts. Als Entwurfswerkzeuge werden in der Regel die sequentielle Strahlverfolgung und die nicht-sequentielle Strahlverfolgung eingesetzt. Auf Basis unterschiedlicher Kriterien können im Rahmen der sequentiellen Strahlverfolgung Aussagen über die Abbildungsqualität des Optikentwurfs gemacht werden. Für den Erhalt realitätsnaher Ergebnisse sind dabei fertigungs- und ausrichtungsbedingte Abweichungen zu berücksichtigen. Bei der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung können, unter Berücksichtigung von Streu- und Reflexionsstrahlung sowie Absorptionsverlusten, Aussagen über die optische Effizienz des Optikentwurfs getroffen werden.

In Anbetracht der erwähnten Herausforderungen werden in der vorliegenden Arbeit Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme unter Berücksichtigung der Étendue erarbeitet. Die Anwendbarkeit der Methoden wird am Beispiel eines DMD-Scheinwerfers zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen nachgewiesen.

Wissenschaftliche Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die wissenschaftliche Vorgehensweise zur Durchführung der vorliegenden Arbeit erfolgt in Anlehnung an DUFFY ET AL. [DUFF99]. Basierend auf einer anfänglichen Literatur- und Anwendungsanalyse der Grundlagen und dem Stand der Wissenschaft werden zunächst die wissenschaftliche Herausforderungen identifiziert. In einer anschließenden Diskussion dieser Herausforderungen werden drei Forschungsfragen abgeleitet, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden.

Entsprechend der wissenschaftlichen Vorgehensweise erfolgt in Kapitel 2 zunächst eine Einführung in die Beleuchtungstechnik. Angefangen mit der Erläuterung photometrischer Größen wird im Folgenden auf die Étendue als Erhaltungsgröße in optischen Systemen eingegangen. Darauf aufbauend werden Technologien zur Lichterzeugung und -modulation vorgestellt, deren

Funktionsprinzip erläutert und der Zusammenhang zur Étendue hergestellt. Abschließend wird auf ausgewählte optische Elemente zur Strahlformung und -ablenkung sowie den Strahlengang in optischen Systemen eingegangen.

Weiterführend werden in Kapitel 2 Werkzeuge und Methoden zum Entwerfen optischer Systeme vorgestellt. Angefangen mit einem Überblick über die sequentielle und nicht-sequentielle Strahlverfolgung als Werkzeuge wird im Anschluss auf deren Merkmale und Anwendungsbereiche eingegangen. Daraufhin erfolgt eine Übersicht zu verschiedenen Methoden zum Entwerfen optischer Systeme nach KINGSLAKE [KING10], MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. [MALA18], FISCHER [FISC08], VELZEL [VELZ14] und GROSS [GROS07]. Im letzten Abschnitt von Kapitel 2 werden aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hochauflösende Lichtsysteme unter Verwendung der DMD-Technologie dargelegt.

In Kapitel 3 werden die im Stand der Wissenschaft identifizierten wissenschaftlichen Herausforderungen aufgezeigt, diskutiert und zu drei wissenschaftlichen Fragestellungen formuliert. Der Fokus liegt hierbei auf den bestehenden Methoden zum Entwerfen optischer Systeme und ihrer Applikabilität für hochauflösende Lichtsysteme.

In Kapitel 4 werden die in dieser Arbeit entwickelten Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme hergeleitet und im Hinblick auf die einzelnen Schritte, Herangehensweisen und Ergebnisse erläutert. Beginnend mit der Definition von Anforderungen an das optische System werden innerhalb der Methode zum Konzipieren sukzessiv spezifische Konzipierungsschritte durchgeführt, bis im letzten Schritt ein Strahlenmodell erstellt wird. Basierend auf dem Strahlenmodell erfolgt anschließend ein planmäßiges und regelbasiertes Vorgehen zum Entwerfen und Optimieren des hochauflösenden Lichtsystems. Dabei wird unter Berücksichtigung von Toleranzen und Streulicht im Rahmen der sequentiellen und nicht-sequentuellen Strahlverfolgung der Entwurf hinsichtlich der Abbildungsqualität und des Wirkungsgrad bewertet und optimiert.

In Kapitel 5 wird die Methode zum Konzipieren am Beispiel eines hochauflösenden Lichtsystems für die Fahrzeugfrontbeleuchtung unter Verwendung der DMD-Technologie zur Lichtmodulation angewandt. Das Kapitel ist dabei entsprechend der Konzipierungsschritte gegliedert. Angefangen mit der Definition von Anforderungen an den Fahrzeugscheinwerfer wird anschließend auf Konzepte zur Lichtmodulation unter Verwendung der DMD-Technologie eingegangen. Im nächsten Abschnitt erfolgt auf Basis von LEDs zur Lichterzeugung die Erarbeitung von Konzepten zur Umsetzung hochlumiger Weißlichtquellen für die Beleuchtung des DMDs. Darauf aufbauend werden unterschiedliche Systemarchitekturen, welche durch die räumliche Anordnung optischer Elemente zur Strahlformung und -ablenkung unter Berücksichtigung des

Strahlengangs im optischen System beschrieben werden, konzipiert und diskutiert. Im Hinblick auf den Anwendungsbereich werden daraufhin geeignete Strategien zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DMDs sowie Verzeichnungskonzepte für die Projektion in den Verkehrsraum erörtert. Im letzten Abschnitt erfolgt die Ausarbeitung eines Strahlenmodells, welches als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf des konzipierten Lichtsystems verwendet wird.

Kapitel 6 ist entsprechend der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme gegliedert. Dabei erfolgt zunächst auf Basis des Strahlenmodells und den eingangs definierten Anforderungen die Festlegung der Emissionscharakteristik und -fläche der Lichtquelle sowie der Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen für den sequentiellen Optikentwurf. Im folgenden Abschnitt wird auf die Erstellung der *Merit Function* (dt. Bewertungsfunktion) und die Optimierung des sequentiellen Entwurfs eingegangen. Anschließend erfolgt unter Berücksichtigung von Toleranzen die Bewertung der Abbildungsqualität. Mit Erfüllung der Abbildungsqualität wird der Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs bewertet.

Das abschließende Kapitel 7 ist in die Zusammenfassung, kritische Würdigung und den Ausblick der Ergebnisse dieser Arbeit gegliedert. Im Rahmen der kritischen Würdigung werden die Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme im Hinblick auf deren Nutzen und Übertragbarkeit auf andere Lichtsysteme gewürdigt. Im Ausblick wird der Ansatz zur Umsetzung einer hybriden Strahlverfolgung diskutiert, um zukünftig Lichtsysteme noch effizienter und zielgerichteter entwerfen und optimieren zu können. Weiterhin wird auf die Integration des konzipierten und entworfenen DMD-Scheinwerfers in den Versuchsträger eingegangen.

2 Stand der Wissenschaft

In Kapitel 2 werden im Abschnitt Beleuchtungstechnik zunächst photometrische Größen erläutert, mithilfe derer Eigenschaften und Anforderungen von Beleuchtungssystemen beschrieben werden können. Anschließend werden die in dieser Arbeit berücksichtigten Technologien zur Lichterzeugung und -modulation vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert. Daraufhin erfolgt eine Einteilung optischer Systeme im Hinblick auf zu berücksichtigende photometrische Auslegungsgrößen sowie dem Verlauf von Strahlengängen in optischen Systemen.

Für den Entwurf optischer Systeme werden unterschiedliche Werkzeuge und Methoden eingesetzt, auf die in Abschnitt 2.2 eingegangen wird. Beginnend mit den Funktionsweisen und Eigenschaften von Strahlverfolgungsprogrammen als Werkzeuge werden anschließend die in der Literatur gängigen Methoden zum Entwerfen optischer Systeme vorgestellt.

Als spezifisches Anwendungsgebiet optischer Systeme wird in Abschnitt 2.3 die Fahrzeugfrontbeleuchtung eingeführt. Dabei werden zunächst auf Grundlage konventioneller Lichtverteilungen für die in Abschnitt 2.1 vorgestellten photometrischen Größen die von der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen vorgeschriebenen Werte erläutert. Abschließend erfolgt ein Überblick über aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hochauflösender Lichtsysteme unter Verwendung der DMD-Technologie im Bereich der Fahrzeugfrontbeleuchtung.

2.1 Beleuchtungstechnik

Im Folgenden werden zunächst die zur Auslegung optischer Systeme erforderlichen photometrischen Größen eingeführt, welche gleichzeitig die Grundlagen zum Verständnis der Étendue bilden. Als Erhaltungsgröße in optischen Systemen wird anschließend die Bedeutung und Applikabilität der Étendue erläutert.

Stellvertretend als Technologie zur Lichterzeugung werden die Funktionsweise von Lumineszenzdioden sowie die Verfahren zur Weißlichterzeugung unter Verwendung dieser Technologie

veranschaulicht. Anschließend wird am Beispiel von Mikrospiegelarrays das Funktionsprinzip der Lichtmodulation vorgestellt sowie der Zusammenhang zwischen der Mikrospiegelanordnung, -verkippung und -beleuchtung in Bezug auf die Étendue vermittelt.

Abschließend werden basierend auf der Einteilung optischer Systeme in der Beleuchtungstechnik optische Elemente zur Strahlformung und -ablenkung vorgestellt sowie auf den Verlauf der Strahlengänge im optischen System eingegangen.

2.1.1 Photometrische Größen

Photometrische Größen ergeben sich aus strahlungsphysikalischen (radiometrischen) Größen des elektromagnetischen Spektrums im sichtbaren Wellenlängenbereich von 380 nm (blau) bis 780 nm (rot) unter Berücksichtigung des photometrischen Strahlungsäquivalents K_m und der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges $V(\lambda)$. Durch Einbeziehung von $V(\lambda)$ kann die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigt werden, weshalb dieses Einheitensystem einen physiologischen Charakter aufweist [MESC15].

Lichtstrom

Der Lichtstrom Φ_v einer Lichtquelle ist als die in den Raum emittierte Strahlungsleistung im sichtbaren Wellenlängenbereich definiert und lässt sich mithilfe der Gleichung 2.1 bestimmen. Für breitbandige Strahlung wird der in Lumen (lm) gemessene Lichtstrom aus dem Produkt von K_m und dem Integral des spektralen Strahlungsflusses $\Phi_{e,\lambda}$, welcher mit $V(\lambda)$ bewertet wird, ermittelt.

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda. \quad (2.1)$$

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke E_v wird in der Einheit Lux (lx) gemessen und ist der differentielle Quotient aus dem auf ein Flächenelement einfallenden Lichtstromanteil $d\Phi_v$ und des beleuchteten Flächenelements dA , sodass gilt:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}. \quad (2.2)$$

Lichtstärke

Die Lichtstärke I_v ist der Lichtstromanteil $d\Phi_v$, der in ein Raumwinkelement $d\Omega$ emittiert wird. Gemessen in der SI-Einheit Candela (cd) ergibt sich die Lichtstärke dementsprechend aus

dem differentiellen Quotienten von Lichtstrom und Raumwinkel (Gleichung 2.3). 1 Candela entspricht dabei der monochromatischen Strahlung mit einer Frequenz $5,4 \cdot 10^{14}$ Hz bzw. Wellenlänge von 555 nm, welche mit einer Strahlstärke von $\frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}$ emittiert wird [DIN5031-3].

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (2.3)$$

Ausgehend vom Scheitelpunkt des Raumwinkelements $d\Omega$ wird dieses in einem Abstand r durch das Flächenelement dA begrenzt. Demzufolge gilt

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} \cdot d\Omega_0, \quad (2.4)$$

wobei $d\Omega_0$ durch den Einheitsraumwinkel 1 sr beschrieben wird.

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte L_v ist als der Lichtstromanteil $d^2\Phi_v$ definiert, der, bezogen auf ein scheinbar leuchtendes Flächenelement dA , unter dem Öffnungswinkel θ in ein Raumwinkelement $d\Omega$ emittiert wird. Entsprechend dieser Definition kann die Leuchtdichte L_v auch als der emittierte Lichtstärkeanteil dI_v eines scheinbar leuchtenden Flächenelements dA unter dem Winkel θ verstanden und gemäß Gleichung 2.5 berechnet werden. Gemessen in der Einheit $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ wird mithilfe der Leuchtdichte der Helligkeitseindruck, der ausgehend von einer leuchtenden Fläche im Auge entsteht, wiedergegeben [SCHÖ18].

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega} = \frac{dI_v}{dA \cdot \cos(\theta)} \quad (2.5)$$

Photometrisches Grundgesetz

Basierend auf den Gleichungen 2.4 und 2.5 kann das photometrische Grundgesetz bestimmt und so die Ausbreitung von Licht beschrieben werden [DIN5031-1]. Für die Lichtausbreitung gilt, dass ein Senderflächenelement dA_S mit der Leuchtdichte L_v unter dem Winkel θ_S einem von ihm im Abstand r entfernten Empfängerflächenelement dA_E den Lichtstrom $d^2\Phi_v$ unter dem Winkel θ_E zustrahlt.

$$d^2\Phi_v = L_v \cdot \frac{dA_S \cdot \cos(\theta_S) \cdot dA_E \cdot \cos(\theta_E)}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (2.6)$$

Aus dem Symmetrieverhalten von Gleichung 2.6 folgt, dass Sender- und Empfängerflächenelement bei identischer Leuchtdichte L_v miteinander getauscht und dessen ungeachtet der gleiche Lichtstrom übertragen werden kann. Der geometrische Zusammenhang der Lichtstromausbreitung in Gleichung 2.6 wird auch als geometrischer Fluss bzw. Étendue bezeichnet [FLÜG67, CHAV08, KOSH13].

2.1.2 Étendue

Der Begriff Étendue kommt aus dem Französischen und bedeutet Ausdehnung oder Ausbreitung. Im Deutschen wird die Étendue zum Teil auch als geometrischer Fluss oder Lichtleitwert bezeichnet [BAER16, GRIM88]. Als Formelzeichen wird für die Étendue in DIN 5031 TEIL 1 [DIN5031-1] sowie der meisten Literatur [BAER16, GRIM88, KOSH13] der Buchstabe G verwendet, welches auch in dieser Arbeit der Fall ist. Mithilfe der Étendue wird die Fähigkeit einer Quelle Strahlung zu emittieren beziehungsweise eines optischen Systems Strahlung aufzunehmen beschrieben. Typischerweise ist ein optisches System aus mindestens einer Lichtquelle (Sender), einem optischen Element zur Strahlformung sowie einem Detektor (Empfänger) aufgebaut. Innerhalb jedes optischen Systems existiert ein étenduelimitierendes Element, welches die niedrigste Étendue aufweist und somit die Lichtleitung limitiert. Ausgehend von einem rotationsymmetrischen optischen System kann vereinfachend zur räumlichen Étendue die flächige Étendue betrachtet werden (Abbildung 2.1), wobei die nachfolgenden Zusammenhänge unter Annahme eines verlustfreien optischen Systems gelten.

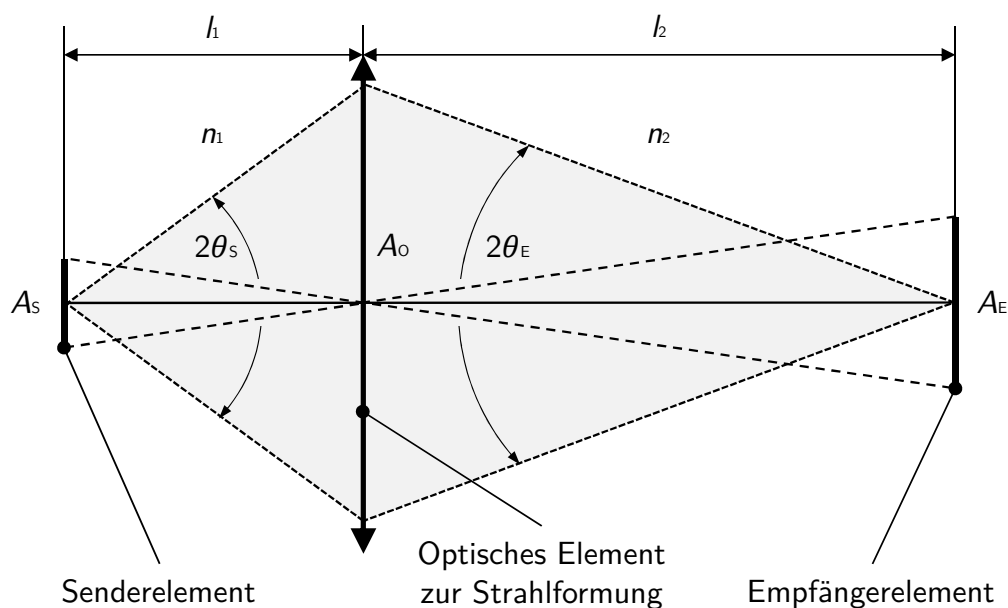


Abbildung 2.1: Étendueerhaltung in einem verlustfreien optischen System

Die Étendue G_S eines Senderelements, beispielsweise einer Lichtquelle mit einer kreisrunden Fläche A_S , die unter dem Öffnungswinkel θ_S Strahlung emittiert, lässt sich, unter Berücksichtigung des Brechungsindex n_1 vom umgebenden Medium, mithilfe der Gleichung 2.7 bestimmen [CHAV08].

$$G_S = n_1^2 \cdot \pi \cdot A_S \cdot \sin^2(\theta_S) \quad (2.7)$$

Analog gilt für die Étendue G_E des Empfängerelements, beispielsweise eines Detektors mit der kreisrunden Fläche A_E , auf das die vom Senderelement emittierte Strahlung über das optische Element zur Strahlformung unter dem Öffnungswinkel θ_E gelenkt wird:

$$G_E = n_2^2 \cdot \pi \cdot A_E \cdot \sin^2(\theta_E) \quad (2.8)$$

Ist das umgebende Medium sowohl auf Sender- als auch Empfängerseite Luft, kann der Brechungsindex zu $n_1 = n_2 = 1$ gesetzt werden.

Weist das zur Strahlformung eingesetzte optische Element mit der Fläche A_O die gleiche (oder eine größere) Étendue wie das Senderelement auf, kann die vom Senderelement emittierte Strahlung vollständig in das optische System eingekoppelt werden. Gleiches gilt für die Beziehung zwischen optischem Element und Empfängerelement. Im Idealfall ist die Étendue des Senderelements (G_S), des optischen Elements zur Strahlformung (G_O) und des Empfängerelements (G_E) gleich groß, sodass das Prinzip der Étendueerhaltung in Gleichung 2.9 gilt.

$$G_S = G_O = G_E \quad (2.9)$$

Erfolgt die Lichtausbreitung wie bei einem DMD in zwei Richtungen unterschiedlich, also nicht rotationssymmetrisch, ist an Stelle der vereinfachten flächigen Étendue die räumliche Étendue zu betrachten.

Räumliche Étendue

Bezogen auf das Sender- beziehungsweise Empfängerelement werden bei der räumlichen Étendue die Dimensionen der Fläche berücksichtigt. Für eine rechteckige Fläche mit den Kantenlängen l_x und l_y (Abbildung 2.2 (a)) lässt sich die räumliche Étendue nach BHAKTA ET AL. [BHAK15] und GUT [GUT17] entsprechend den Gleichungen 2.10 und 2.11 bestimmen.

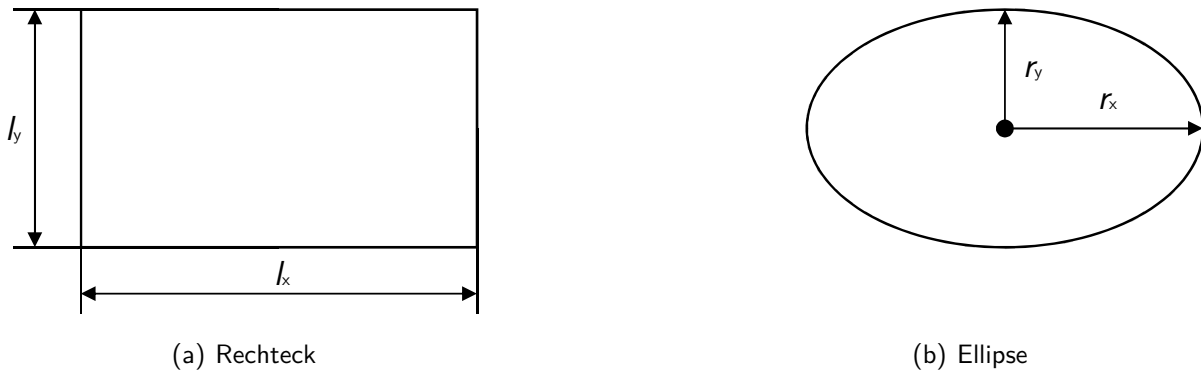


Abbildung 2.2: Längenmaß eines Rechtecks (a) bzw. einer Ellipse (b) zur Berechnung der räumlichen Étendue nach [GUT17]

Basierend auf der Formel der flächigen Étendue (2.7 bzw. 2.8) ist zunächst die Étendue der jeweiligen Raumrichtung zu bestimmen.

$$G_x = n \cdot l_x \cdot \cos(\alpha_x) \cdot \sin(\theta_x) \quad (2.10)$$

$$G_y = n \cdot l_y \cdot \cos(\alpha_y) \cdot \sin(\theta_y) \quad (2.11)$$

Die Verkippung der Fläche in der jeweiligen Raumrichtung um den Winkel α wird dabei durch die Kosinusfaktoren der Terme berücksichtigt. Nach BHAKTA ET AL. [BHAK15] lässt sich die räumliche Étendue der rechteckigen Fläche infolge der Multiplikation der flächigen Étendue beider Raumrichtungen zu

$$G_{\text{Rechteck}} = G_x \cdot G_y = n^2 \cdot A_{\text{Rechteck}} \cdot \cos(\alpha_x) \cdot \sin(\theta_x) \cdot \cos(\alpha_y) \cdot \sin(\theta_y) \quad (2.12)$$

bestimmen. Für eine elliptische Fläche mit den in Abbildung 2.2 (b) dargestellten Dimensionen lässt sich die räumliche Étendue durch Gleichung 2.13 beschrieben.

$$G_{\text{Ellipse}} = n^2 \cdot A_{\text{Ellipse}} \cdot \cos(\alpha_x) \cdot \sin(\theta_x) \cdot \cos(\alpha_y) \cdot \sin(\theta_y) \quad (2.13)$$

Die Étendue als Erhaltungsgröße in optischen Systemen kann entsprechend mit der Entropie in der Thermodynamik verglichen werden. Demzufolge gilt, dass die Étendue eines Lichtbündels, welches ein optisches System propagiert, entweder erhalten (Idealfall) oder in Folge von Diffusion, Streuung, Aberration und Beugung an unvollkommenen optischen Elementen vergrößert wird (Realfall). Eine verlustfreie Reduktion der Étendue ist jedoch nicht möglich. Daher eignet sich die Étendue bereits in der Konzipierungsphase als eine wichtige Auslegungsgröße zur Umsetzung effizienter optischer Systeme.

2.1.3 Lumineszenzdioden

Die intensive Forschung des vergangenen Jahrzehnts im Bereich der LED-Entwicklung hat zu einer zunehmenden Verdrängung konventioneller Lichtquellen wie Glüh-, Halogen- oder Entladungslampen geführt [LEY18a]. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in der hohen Effizienz bei der Lichterzeugung von LEDs [PATT18], welche durch die sogenannte Lichtausbeute gekennzeichnet ist. Als Verhältnis aus emittiertem Lichtstrom und aufgenommener elektrischer Leistung ist die Lichtausbeute η_v in $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$ von der emittierten Wellenlänge und dem Anteil elektrischer Leistung, die in Strahlungsleistung umgewandelt wird, abhängig. Ausgehend von monochromatischem Licht der Wellenlänge 555 nm und einer vollständigen Umwandlung der elektrischen Leistung in Strahlungsleistung lässt sich, unter Zuhilfenahme der Gleichung 2.1, die maximal mögliche Lichtausbeute zu $683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ bestimmen. Erfolgt die LED-basierte Weißlichterzeugung nach dem Prinzip der Lumineszenzkonversion wird die maximale mögliche Lichtausbeute infolge von Konversionsverlusten auf $414 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ reduziert. Abweichend von diesen Idealwerten werden für die kommenden Jahre Lichtausbeuten von bis zu $255 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für die LED-basierte Weißlichterzeugung mittels Lumineszenzkonversion und bis zu $330 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für Multichip-LEDs, bei denen auf Basis additiver Farbmischung weißes Licht erzeugt wird, prognostiziert. [PATT18]

Einhergehend mit der gesteigerten Lichtausbeute der vergangenen Jahre ist auch die spezifische Lichtausstrahlung von LEDs gestiegen. Definiert als Lichtstrom, der von einem Flächenelement emittiert bzw. reflektiert wird [BREC16, WOSN12], eignet sich die spezifische Lichtausstrahlung gut als Grundlage für den Vergleich von LEDs. In Abbildung 2.3 ist für ausgewählte LEDs der Fahrzeugfrontbeleuchtung die jeweils spezifische Lichtausstrahlung dargestellt.

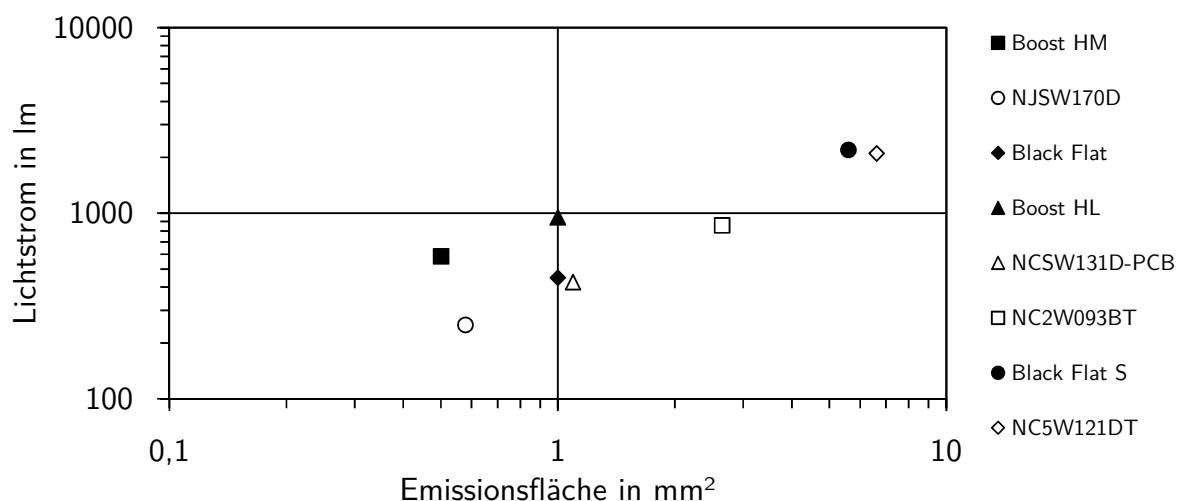


Abbildung 2.3: Spezifische Lichtausstrahlung von LEDs für die Fahrzeugfrontbeleuchtung [OSRA21, NICH21d, OSRA20b, OSRA20d, NICH21c, NICH21a, OSRA20c, NICH21b]

Mit dem beispielhaften Vergleich der drei LEDs Black Flat, NCSW131D und Boost HL wird deutlich, dass die Emissionsflächen der drei LEDs mit nahezu 1 mm^2 gleich groß sind. Der Lichtstrom der Boost HL ist jedoch mit 949 lm mehr als doppelt so hoch. Die deutlich höhere spezifische Lichtausstrahlung ist in der neuen LED-Generation begründet, welche durch die Boost LEDs repräsentiert wird.

Funktionsweise von LEDs

Bestehend aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleitermaterialien basiert die Lichterzeugung bei LEDs auf dem Prinzip der Elektrolumineszenz. Innerhalb der jeweiligen Halbleiter befinden sich frei bewegliche Elektronen (\ominus) in einem sogenannten Leitungsband und frei bewegliche Löcher (\oplus) in einem Valenzband. Durch Energiezufuhr von außen z. B. in Form einer Spannung werden kontinuierlich Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben. Gleichzeitig wandern fortwährend Elektronen unter Abgabe von Energie vom Leitungsband in das Valenzband (Abbildung 2.4).

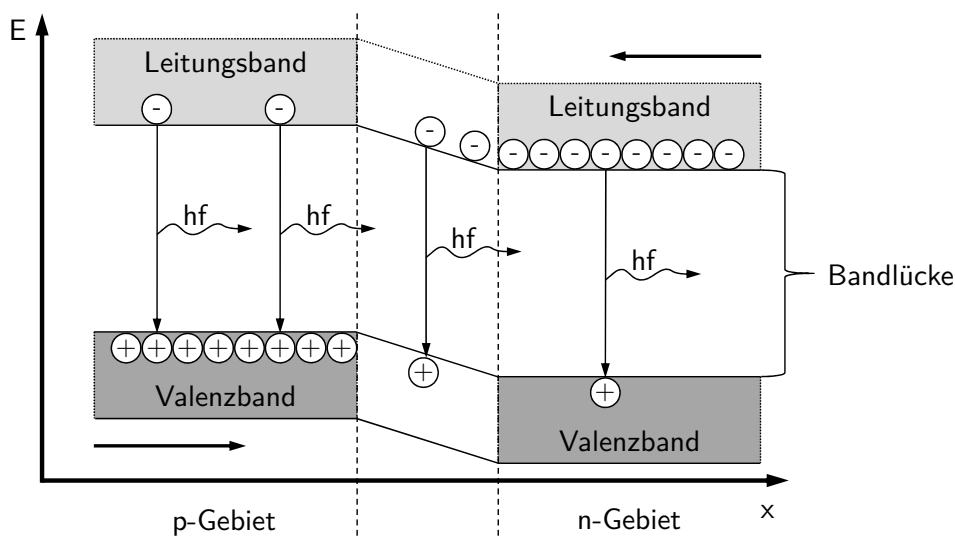


Abbildung 2.4: Energieschema zur strahlenden Rekombination am pn-Übergang nach [HERI17a] und [STIN19]

Die Bildung von Elektronen-Loch-Paaren, also die Vereinigung von Elektronen aus dem Leitungsband mit Löchern aus dem Valenzband, wird als Rekombination bezeichnet. Grundsätzlich wird zwischen strahlender Rekombination, bei der die Abgabe von Photonen ($E = hf$) erfolgt, und nichtstrahlender Rekombination, bei der die freiwerdende Energie in Wärme umgewandelt wird, unterschieden. Die Art der Rekombination ist dabei von den verwendeten Halbleitermaterialien abhängig, wobei letztere nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Bei der strahlenden Rekombination hängt die emittierte Wellenlänge des Lichtquants von der Bandlücke, auch Sperrschicht genannt (vgl. Abbildung 2.4), dem verwendeten Halbleitermaterial und von der

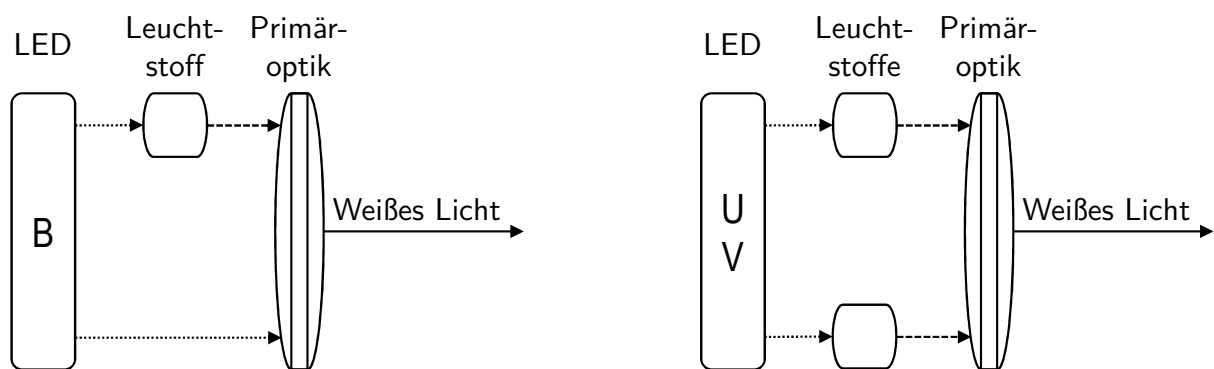
Temperatur ab [LÖFF12]. Durch Kombination unterschiedlicher Halbleitermaterialien und Dotierungen besteht die Möglichkeit das sichtbare Spektrum (Tabelle 2.1) bis hin zum IR-Bereich vollständig abzudecken. Um LEDs zu erhalten, die beispielsweise rotes Licht emittieren, werden vorzugsweise Aluminiumindiumgalliumphosphide (AlGaInP) als Halbleitermaterial eingesetzt. Bei grünen und blauen LEDs erfolgt primär der Einsatz von Indiumgalliumnitrid (InGaN) als Halbleitermaterial. Das Verhältnis von Galliumnitrid (GaN) und Indiumnitrid (InN) entscheidet dabei über die emittierte Wellenlänge [SCHW15]. Weiterhin besteht mithilfe unterschiedlicher Verfahren die Möglichkeit zur Umsetzung LED-basierter Weißlichtquellen [STIN19, WOSN12].

Tabelle 2.1: Ausgewählte Materialkombinationen unterschiedlicher LEDs nach [HERI17a]

Farbe	zentrale Wellenlänge λ in nm	Material- kombinationen	Lichtausbeute η_v in $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
rot	650	GaAs _{0,6} P _{0,4} , AlGaInP	35
grün	570	GaP:N, AlGaInN	100
blau	470	InGaN, AlGaInN	25
weiß	-	InGaN + YAG:Ce	110

Weißlichterzeugung mittels LEDs

Ein Verfahren zur LED-basierten Weißlichterzeugung ist die sogenannte Lumineszenzkonversion, bei der kurzwellige und dementsprechend energiereiche Strahlung einer blauen- oder UV-LED zur Anregung eines Leuchtstoffs eingesetzt wird (Abbildung 2.5). Unter Verwendung einer blauen LED (B) wird, infolge der Leuchtstoffanregung, ein Teil der kurzwelligen Strahlung (Primärstrahlung) zu langwelliger energieärmerer Strahlung (Sekundärstrahlung) konvertiert (Abbildung 2.5 (a)). Die Mischung der Primär- und Sekundärstrahlung resultiert in Strahlung, welche vom menschlichen Betrachter als weißes Licht wahrgenommen wird.



(a) Blaue LED u. Leuchtstoff nach [LACH14b]

(b) UV-LED u. Leuchtstoff nach [LACH14b]

Abbildung 2.5: LED-basierte Weißlichterzeugung mittels Lumineszenzkonversion

Aufgrund der hohen Konversionseffizienz von Cerium-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat (YAG:Ce) hat sich insbesondere dieser Leuchtstoff bei der Lumineszenzkonversion unter Verwendung blauer LEDs etabliert [SEON13, GORR15, HANS19]. Abgesehen vom verwendeten Leuchtstoff ist die Konversionseffizienz leuchtstoffbasierter Halbleiterlichtquellen zusätzlich von der emittierten Wellenlänge und der Betriebstemperatur der Halbleiterlichtquelle abhängig [LACH14b]. Bei der Verwendung einer UV-LED zur Anregung des Leuchtstoffs erfolgt, im Gegensatz zur blauen LED, jedoch eine vollständige Konversion der emittierten Strahlung [SMET11, CHO17].

Ein weiteres Verfahren zur LED-basierten Weißlichterzeugung ist die additive Mischung der emittierten Wellenlängen einer blauen, grünen und roten LED (Abbildung 2.6 (a)). Die technische Realisierung kann dabei unterschiedlich ausgeführt werden. Eine Möglichkeit ist die räumliche Integration der drei einzelnen LED-Chips in einem Gehäuse zu einer sogenannten Multichip-LED, mit dem Ziel eine möglichst kompakte Anordnung umzusetzen. Hierdurch kann der Einsatz zusätzlicher optischer Elemente zur Homogenisierung der emittierten Strahlung vermieden werden. Bei der Verwendung separater LEDs können die unterschiedlichen Wellenlängen der emittierten Strahlung durch den Einsatz spezieller optischer Elemente wie Prismen oder Spiegel miteinander kombiniert werden, welches in Kapitel 5.3 näher ausgeführt wird.

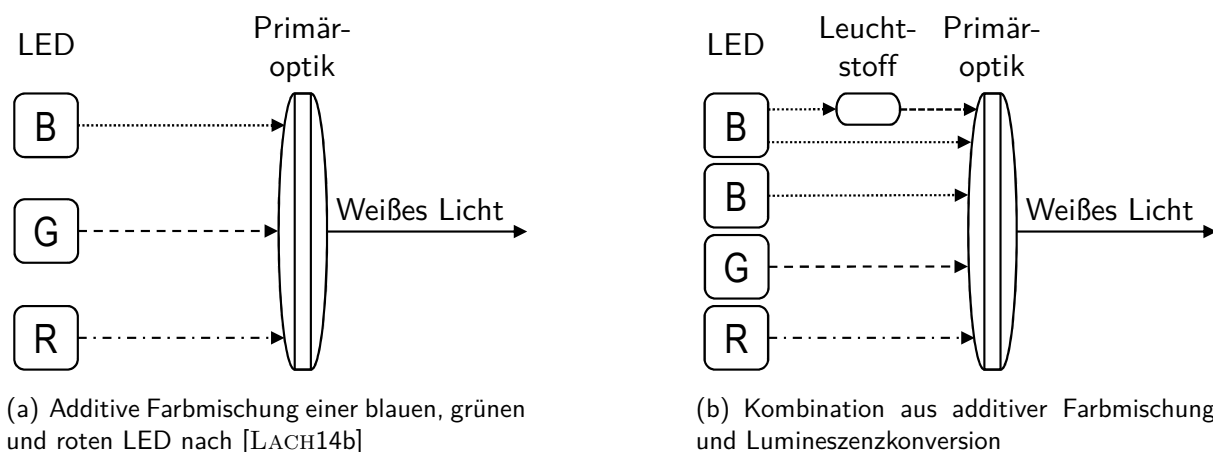


Abbildung 2.6: LED-basierte Weißlichterzeugung mittels additiver Farbmischung

Darüber hinaus können die Verfahren der Lumineszenzkonversion und der additiven Farbmischung für die LED-basierte Weißlichterzeugung kombiniert werden (Abbildung 2.6 (b)). LEDs, bei denen eine räumlichen Integration einer blauen, grünen, roten und zusätzlichen blauen LED mit Leuchtstoff in einem Gehäuse erfolgt, wie bei der Ostar[®] Stage LE RTDUW S2WP [OSRA20f], werden umgangssprachlich auch als RGBW-LEDs bezeichnet.

Lichtstärkeverteilung von LEDs

LEDs sind typischerweise als Flächenemitter ausgeführt [SCHU18], wodurch eine Abhängigkeit zwischen emittierter Lichtstärke und Emissionswinkel resultiert [HERI17b]. Die winkelabhängige Lichtstärkeverteilung von LEDs mit diffus streuenden Flächen wie der Leuchtstoffschicht bei "weißen" LEDs kann in guter Näherung mithilfe des Lambert'schen Kosinussatzes (Gleichung 2.14) beschrieben werden [HERI17b].

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos(\theta) \quad (2.14)$$

Dabei gilt, dass die Bezugslichtstärke I_0 mit dem Kosinus des Winkels θ zur Flächennormalen abnimmt. Bei einem Emissionswinkel von $\theta = \pm 60^\circ$ resultiert dementsprechend eine Reduktion der Lichtstärke auf 50 % des Maximalwerts. Dieser Wert von insgesamt 120° wird als Halbwertsbreite (engl. *Full Width at Half Maximum*, kurz FWHM) bezeichnet und stellt ein wichtiges Kriterium bei der anwendungsspezifischen Auswahl von LEDs dar [LEY18a]. Aus diesem Grund wird die Lichtstärkeverteilung, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, häufig in Polarkoordinaten von den Herstellern in den Datenblättern der LEDs ausgewiesen.

Abgesehen von der typisch lambert'schen Lichtstärkeverteilung existieren auch abweichende Verteilungen. So besteht beispielsweise die Möglichkeit durch eine geeignete Formgestaltung der zumeist aus Silikon bestehenden Vergussmasse, welche primär dem Schutz des LED-Chips vor Umwelteinflüssen dient, eine strahlformende Wirkung ähnlich wie bei Linsen zu erzielen [HERI17b].

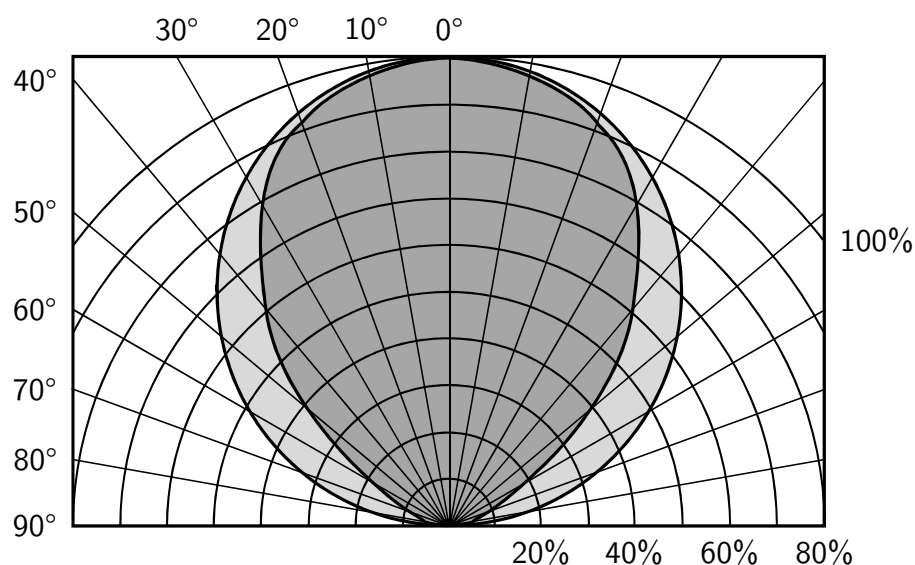


Abbildung 2.7: Lichtstärkeverteilung der LUW HWQP (hellgrau) und LUW H9GP.CE (dunkelgrau) LED aus Datenblatt [OSRA20a, OSRA20b]

Verdeutlicht wird dies in Abbildung 2.7 an Hand der Lichtstärkeverteilung zweier unterschiedlicher LEDs. Die LUW HWQP (hellgrau) weist eine typisch lambert'sche Verteilung der Lichtstärke mit einem FWHM-Wert bei $\theta = \pm 60^\circ$ auf. Aufgrund der strahlformenden Wirkung der Vergussmasse ist die LUW H9GP.CE (dunkelgrau) durch eine gerichteterere Lichtstärkeverteilung, mit einem FWHM-Wert bei $\theta = \pm 45^\circ$ gekennzeichnet.

Ist für einen Lambertstrahler der in den 2π -Halbraum abgestrahlte Lichtstrom in Abhängigkeit des Emissionswinkels θ zu bestimmen, kann dies basierend auf den Gleichungen 2.3 und 2.14 erfolgen. Durch einsetzen der Gleichung 2.3 in Gleichung 2.14 folgt Gleichung 2.15.

$$d\Phi_v = I_0 \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega \quad (2.15)$$

Für das Raumwinkelement $d\Omega$, welches durch das vom Emissionswinkel θ aufgespannte Flächenelement dA begrenzt wird, folgt nach Gleichung 2.4

$$d^2\Omega = \Omega_0 \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\varphi. \quad (2.16)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 2.16 in Gleichung 2.15 und anschließender Integration ergibt sich der in den 2π -Halbraum abgestrahlte Lichtstrom eines Lambertstrahler in Abhängigkeit des Emissionswinkels θ zu

$$\Phi_v = I_0 \cdot \Omega_0 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta_1} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \cdot d\varphi = \pi \cdot I_0 \cdot \Omega_0 \cdot \sin^2(\theta_1). \quad (2.17)$$

2.1.4 Mikrospiegelarrays

Digitale Mikrospiegelarrays (DMDs) als bistabile räumliche Lichtmodulatoren sind sowohl optomechanische als auch elektromechanische Elemente, deren aktive Fläche aus einer zweidimensionalen Anordnung mikroskopisch kleiner Spiegel aufgebaut ist. Jeder Mikrospiegel ist dabei auf der Unterseite über eine Durchkontaktierung an einem Drehgelenk befestigt und kann innerhalb des Arrays individuell angesteuert werden. Als elektromechanisches Element kann ein einzelner Mikrospiegel im Betrieb durch Anlegen einer Spannung zwei unterschiedliche Positionen einnehmen, welche auch als *On-State* respektive *Off-State* bezeichnet werden. Ein dritte Position, den sogenannten *Flat-State*, welcher kein Betriebszustand ist, wird von den Mikrospiegeln nur im spannungslosen Zustand eingenommen. Die geometrischen Positionen der beiden Betriebszustände resultieren aus der Geometrie und Elektrostatik des Mikrospiegels. Anfänglich haben DMDs einen Kippwinkel von $\pm 10^\circ$ aufgewiesen [FLOR96]. Gegenwärtig sind

Kippwinkel mit $\pm 12^\circ$ oder $\pm 17^\circ$ typisch [ROBI05, TEXA19b]. Als optomechanisches Element bedingen die beiden Betriebszustände des Mikrospiegels in welche Richtung das einfallende Licht reflektiert wird (Abbildung 2.8). Befinden sich die Mikrospiegel im *On-State* wird das einfallende Licht von den Mikrospiegeln in ein Projektionssystem reflektiert und dementsprechend für die Anwendung genutzt. Im *Off-State* erfolgt die Reflexion des Lichts in einen Absorber und wird folglich nicht genutzt, wodurch eine Reduktion des Wirkungsgrades resultiert.

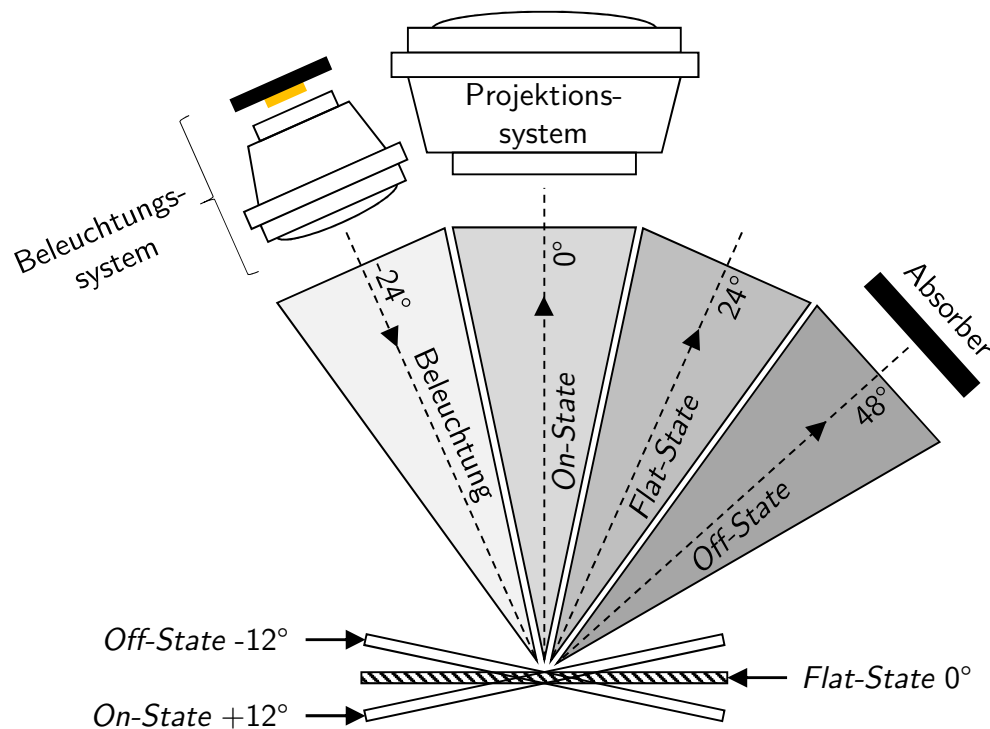


Abbildung 2.8: Mikrospiegelposition bei einem Kippwinkel von $\pm 12^\circ$ nach [TEXA10]

Die Abmessungen des zweidimensionalen Arrays werden von der Anordnung und Anzahl der Mikrospiegel, also der Auflösung des DMDs, sowie der Mikrospiegelgröße bestimmt. Innerhalb des Arrays kann die Anordnung der Mikrospiegel auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen (Abbildung 2.9), welches einen wesentlichen Einfluss auf die Beleuchtungsrichtung hat.

Bezogen auf die Kanten des DMD-Chips kann die Anordnung der Mikrospiegel parallel oder diagonal erfolgen. Eine parallele Anordnung führt zur sogenannten *Orthogonal Pixel Array*-Anordnung (Abbildung 2.9 (a)) und erfordert eine als *Corner Illumination* (CI) bezeichnete Beleuchtung des Arrays. Die als *Diamond Pixel Array* bezeichnete Anordnung (Abbildung 2.9 (b)) wird infolge einer diagonalen Anordnung der Mikrospiegel erreicht und bedarf einer sogenannten *Bottom Illumination* (BI). Das Funktionsprinzip des DMDs ist von der Spiegelanordnung unabhängig, nicht jedoch die Ermittlung des Seitenverhältnisses. Für einen DMD, welcher als *Orthogonal Pixel Array* ausgeführt ist, kann das Seitenverhältnis über das Verhältnis von Mikrospiegelanzahl in x-Richtung zu y-Richtung bestimmt werden.

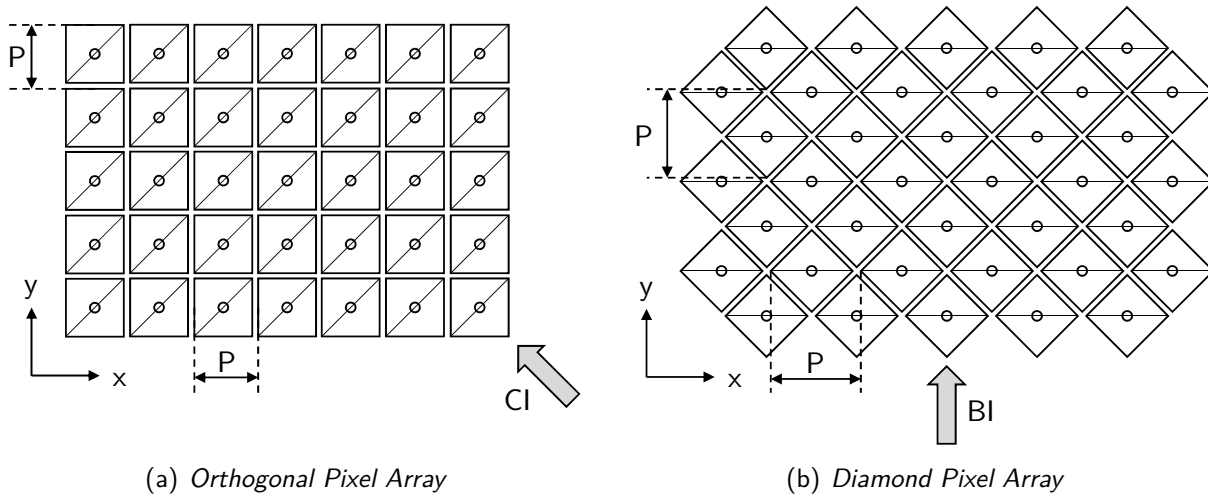


Abbildung 2.9: Ausführungsformen der Mikrospiegelanordnung in einem Array

Aufgrund der abweichenden Definition von Zeilen und Spalten bei der *Diamond Pixel Array*-Anordnung erfolgt die Bestimmung des Seitenverhältnisses über das Verhältnis der jeweiligen Kantenlängen in x- und y-Richtung, welche mithilfe der Gleichungen 2.18 und 2.19 bestimmt werden können.

$$l_x = \frac{P}{2} \cdot (2 \cdot H + 1) \quad (2.18)$$

$$l_y = \frac{P}{2} \cdot (V + 1) \quad (2.19)$$

Dabei ist P als der Abstand der einzelnen Mikrospiegel in x- respektive y-Richtung definiert (vgl. Abbildung 2.9). Die jeweilige Anzahl an Zeilen in x-Richtung und Spalten in y-Richtung wird durch H respektive V beschrieben. Basierend auf den Gleichungen 2.10 und 2.11 aus Kapitel 2.1.2 lässt sich so die flächige Étendue eines *Orthogonal Pixel Arrays* in der jeweiligen Raumrichtung wie folgt bestimmen

$$G_{\text{DMD},x} = n \cdot P \cdot H \cdot \cos(2 \cdot \alpha_{\text{Kip}}) \cdot \sin(\theta_{\text{Bel}}) \quad (2.20)$$

$$G_{\text{DMD},y} = n \cdot P \cdot V \cdot \cos(2 \cdot \alpha_{\text{Kip}}) \cdot \sin(\theta_{\text{Bel}}) \quad (2.21)$$

Dabei wird der Kippwinkel der Mikrospiegel durch α_{Kip} und der Beleuchtungswinkel durch θ_{Bel} beschrieben (vgl. Abbildung 2.8). Durch Multiplikation der Gleichungen 2.20 und 2.21 ergibt sich die räumliche Étendue eines DMDs mit *Orthogonal Pixel Array*-Anordnung zu

$$G_{\text{DMD},x,y} = n^2 \cdot \pi \cdot P^2 \cdot (H \cdot V) \cdot \cos(2 \cdot \alpha_{\text{Kip}}) \cdot \sin^2(\theta_{\text{Bel}}). \quad (2.22)$$

Analog wird durch Multiplikation der Gleichungen 2.20 und 2.21 durch vorheriges Einsetzen der Gleichungen 2.18 und 2.19 die räumliche Étendue eines DMDs mit *Diamond Pixel Array*-Anordnung bestimmt

$$G_{\text{DMD},x,y} = n^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{P}{2}\right)^2 \cdot ((2 \cdot H + 1) \cdot (V + 1)) \cdot \cos(2 \cdot \alpha_{\text{Kip}}) \cdot \sin^2(\theta_{\text{Bel}}). \quad (2.23)$$

Vorteile der DMD-Technologie liegen insbesondere in der hohen mechanischen und elektrischen Widerstandsfähigkeit sowie gegenüber umweltbedingten Einflüssen wie Temperatur und Feuchtigkeit, weshalb die Lebensdauer eines DMDs auf über 100.000 Betriebsstunden geschätzt wird [DOUG03]. Weiterhin führt die hohe Reflektivität der Mikrospiegel von ca. 95 % [CHEN16] bei der Modulation hoher Lichtintensitäten zu einer guten thermischen Stabilität. LCDs hingegen, bei denen das einfallende Licht entweder durch Transmission oder Absorption moduliert wird, weisen entsprechend eine höhere Sensitivität gegenüber hohen Lichtintensitäten auf. Effizienzvorteile der DMD-Technologie gegenüber anderen Technologien wie der LCD- oder LCoS-Technologie resultieren insbesondere aus der Modulation unpolarisierten Lichts [HELD18b]. Die Polarisation führt zu einer Reduktion des nutzbaren Lichtstroms um circa 50 % [FOUR08, REIN17], wenngleich dieser durch ein geeignetes Polarisationskonzept deutlich gesteigert werden kann. HESSE beispielsweise gibt einen nutzbaren Lichtstromanteil von bis zu 80 % an [HESS15]. Ein detaillierte Übersicht über die verschiedenen Modulationstechnologien geben KNÖCHELMANN ET AL. und KLOPPENBURG ET AL. [KNÖC19, KLOP16].

2.1.5 Optische Systeme in der Beleuchtungstechnik

In der Beleuchtungstechnik wird sich mit der Formung und Ablenkung emittierter Strahlung einer Lichtquelle befasst, so dass für den menschlichen Betrachter oder eine technische Anwendung der größtmögliche Nutzen entsteht. Zur Strahlformung und -ablenkung werden sogenannte passive optische Elemente, bestehend aus reflektierenden und transmittierenden Materialien, eingesetzt. Die Oberflächen der reflektierenden und transmittierenden Materialien sind dabei so gestaltet, dass, infolge von Refraktion, Reflexion und teilweise Diffraktion der auftreffenden Lichtstrahlen, eine für die Anwendung oder den Betrachter günstige Lichtverteilung erzeugt wird. Das System aus Lichtquelle und einem optischen Element wird auch als optisches System bezeichnet [HERI06, HERI17b] und kann in drei Hauptgruppen unterteilt werden (Tabelle 2.2), bei denen jeweils explizit eine photometrische Größe im Vordergrund steht.

Tabelle 2.2: Einteilung optischer Systeme in der Beleuchtungstechnik nach [HER17b]

Optische Systeme in der Beleuchtungstechnik			
Beleuchtung		Signalisation	Informationsträger
Innen	Außen		
Medizin- leuchten	Straßen- leuchten	Ampelleuchten	Bildschirmanzeigen
Raum- leuchten	Fassaden- leuchten	Positionsleuchten	Bedienelemente
Schaufenster- leuchten	Kraftfahrzeuge -Fernlicht -Abblendlicht	Kraftfahrzeuge -Fahrtrichtungsanzeiger -Bremsleuchte	Statusanzeigen

Bei optischen Systemen in der Beleuchtung steht beispielsweise die Verteilung der Beleuchtungsstärke im Vordergrund. Signalgeber hingegen müssen je nach Anwendungsgebiet bestimmte Werte für die Lichtstärke und Informationsträger für die Leuchtdichte erfüllen. Zur Erfüllung der geforderten photometrischen Größen besteht die Möglichkeit unterschiedliche optische Elemente zur Strahlformung und -ablenkung einzusetzen, welche nachfolgend im für die Arbeit relevanten Maße vorgestellt werden. Der Fokus liegt hierbei auf refraktiven und reflektierenden optischen Elementen.

Optische Elemente zur Strahlformung

Basierend auf der Refraktion von Licht können Linsen zur Strahlformung eingesetzt werden. In Bezug auf die einfallenden Lichtstrahlen lässt sich die optische Wirkung von Linsen, welche durch die Geometrie der Grenzflächen sowie dem Brechungsindex des Linsenmaterials definiert wird, in divergierend und konvergierend unterteilen [LITF05, GERH16]. Entsprechend werden optische Linsen in Zerstreuungs- und Sammellinsen eingeteilt. Letztere sind in Abbildung 2.10 am Beispiel von Kollimationslinsen dargestellt.

In Abhängigkeit der Grenzflächengeometrie wird weiterhin zwischen sphärischen und asphärischen Linsen unterschieden. Charakterisiert durch ihre Rotationssymmetrie, den Radius der Grenzflächen sowie dem Linsendurchmesser stellen sphärische Linsen die einfachste Linsenbauform dar. Asphärische Linsen, welche sowohl als Freiform oder rotations-symmetrisch ausgeführt werden können, weisen einen variablen Radius entlang ihrer Grenzflächen auf. Hierdurch besteht die Möglichkeit Abbildungsfehler wie die sphärische Aberration (Schärfefehler) auszugleichen. Darüber hinaus werden für vergleichbare Abbildungsqualitäten optischer Systeme weniger Linsen mit asphärischen Grenzflächen als mit sphärischen Grenzflächen benötigt. Insbesondere

re dieser Vorteil gegenüber sphärischen Linsen hat dazu geführt, dass heutzutage sowohl in der Beleuchtungs- als auch Abbildungsoptik bevorzugt asphärische Linsen eingesetzt werden, wengleich deren Herstellung verglichen mit sphärischen Linsen aufwendiger und damit teurer ist [NAUM14].

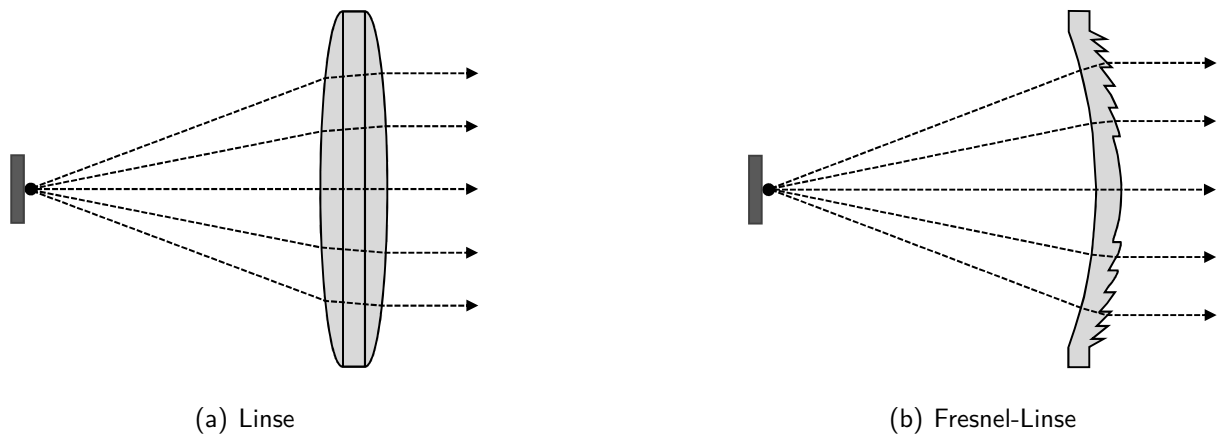


Abbildung 2.10: Optische Elemente zur Strahlformung: Linsen

Rücken Baulänge und Gewicht einer Linse aufgrund ihres Anwendungsbereichs in den Vordergrund und gleichzeitig die Abbildungsqualität in den Hintergrund, bilden Fresnel-Linsen (Abbildung 2.10 (b)) eine Alternative zu sphärischen und asphärischen Linsen [NAUM14]. Bei den aus Ringsegmenten zusammengesetzten Linsen wird der Effekt genutzt, dass der Brechungswinkel einer Linse lediglich durch die Winkel an den Grenzflächen bestimmt wird. Aufgrund der Unabhängigkeit von der Linsendicke besteht so die Möglichkeit kompakte und leichte Linsen zu entwerfen. Das wohl bekannteste Beispiel für den Einsatz von Fresnel-Linsen in der Beleuchtungstechnik ist die Optik von Leuchttürmen.

Abgesehen von Linsen zur Strahlformung werden im Bereich der Beleuchtungstechnik auch Reflektoren eingesetzt. Der Einsatz von Reflektoren zur Strahlformung ist vor allem dann geeignet, wenn die Verwendung von Linsen aufgrund ökonomischer Aspekte nicht sinnvoll ist oder die limitierenden Transmissionseigenschaften des Linsenmaterials negative Auswirkungen auf die Anwendung haben. Basierend auf der optischen Wirkung lassen sich Reflektoren, ähnlich wie Linsen, in konvergierend und divergierend differenzieren [KLOO07]. Als Vertreter konvergierender Reflektoren wird an dieser Stelle der in Abbildung 2.11 (a) dargestellte Ellipsoid-Reflektor herangezogen. Ein typisches Merkmal von Ellipsoid-Reflektoren ist, dass diese zwei Brennpunkte haben. Die im ersten Brennpunkt anfänglich emittierte Strahlung der Lichtquelle wird nach der Reflexion an den Reflektorflächen in einem zweiten Brennpunkt fokussiert. Im Bereich der Beleuchtungstechnik werden Ellipsoid-Reflektoren beispielsweise bei Profilscheinwerfern im Theater und bei Videoprojektoren mit Gasentladungslampen als Lichtquelle eingesetzt.

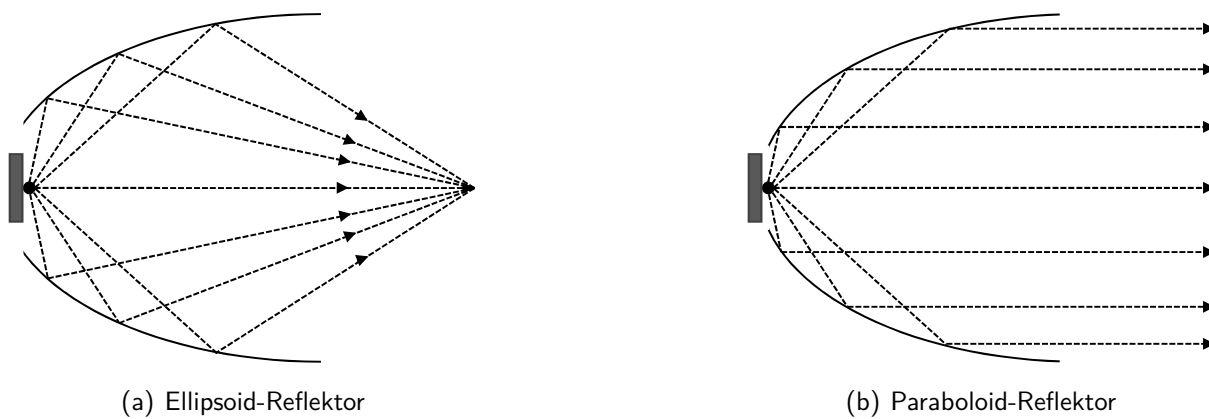


Abbildung 2.11: Optische Elemente zur Strahlformung: Reflektoren

Zur Kollimation von Strahlen eignen sich Paraboloid-Reflektoren (Abbildung 2.11 (b)). Bedingt durch die Reflektorgeometrie wird die anfänglich im Brennpunkt emittierte Strahlung der Lichtquelle nach der Reflexion an den Reflektorflächen kollimiert. Die Effizienz der Kollimation, also wie viele Strahlen durch Reflexion an den Reflektorflächen kollimiert werden, wird dabei im Wesentlichen durch die Länge des Reflektors beeinflusst. Eine Möglichkeit die Effizienz zu steigern ist der Einsatz einer Linse als zusätzliches optisches Element, um den Anteil der Strahlen die nicht durch Reflexion kollimiert werden zu formen [HUAN10, LACH15, TSAI11]. Weiterhin kann ein Sekundärreflektor eingesetzt werden, welcher die unkollimierte Strahlung zurück auf den Hauptreflektor wirft [LACH14a]. Eine gute Übersicht von Ansätzen zur Effizienzsteigerung von Reflektoren wird in der Arbeit von WOLF [WOLF17a] gegeben.

In der Beleuchtungstechnik werden Paraboloid-Reflektoren beispielsweise für Scheinwerfersysteme im Bereich der Fahrzeugfrontbeleuchtung zur Erzeugung von Abblend- und Fernlichtverteilungen eingesetzt [BRAE05, NAUM14, WOLF17a].

Wenngleich Reflektoren insbesondere aufgrund ökonomischer Aspekte Vorteile gegenüber Linsen aufweisen, haben die umfangreichen Anwendungsgebiete in der Optik sowie die Diversität bei der Linsengestaltung dazu geführt, dass zur Strahlformung in optischen Systemen überwiegend Linsen eingesetzt werden [GERH16]. So wird auch im konzeptionellen Teil dieser Arbeit lediglich der Einsatz von Linsen zur Strahlformung in optischen Systemen diskutiert.

Optische Elemente zur Strahlableitung

Optische Elemente zur Strahlableitung können in Prismen und Spiegel eingeteilt werden. Prismen sind häufig glasbasierte Körper mit einer optisch funktionalen Form [LYNC09]. Die Hauptfunktionen von Prismen können in die Ablenkung, Polarisation und Dispersion von Licht eingeteilt werden [GERH16]. Letztere, welche eine spezifische wellenlängenabhängige Ablenkung des einfallenden polychromatischen Lichtes beschreibt, ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Po-

larisationsprismen werden unter anderem bei der Beleuchtung der LCD- und LCoS-Technologie eingesetzt, um das oft unpolarisierte Licht der Lichtquelle zu polarisieren. Prismen zur Ablenkung werden in optischen Systemen eingesetzt, um die Ausbreitungsrichtung des Lichts zu ändern. Dabei basiert die Ablenkung des Lichts auf den zwei Effekten Refraktion und Totalreflexion [GERH16]. Tritt an den optischen Grenzflächen des Prismas zwischen optisch dichterem (z.B. Glas) und optisch dünnerem Medium (z.B. Luft) Refraktion auf, wird das Licht ähnlich wie bei Linsen abgelenkt. Beim Phänomen der Totalreflexion hingegen erfährt das Licht an den optischen Grenzflächen des Prismas eine Rückreflexion in das optisch dichtere Medium (Abbildung 2.12 (a)). Bedingung für die Totalreflexion ist, dass das einfallende Licht den materialspezifischen Grenzwinkel für Totalreflexion nicht unterschreitet. Diese auch als TIR-Prismen (*Total Internal Reflexion*) bezeichneten optischen Elemente ermöglichen bei mehrfachem Einsatz innerhalb eines optischen Systems dessen effektive Baulänge infolge der wiederholten Strahlablenkung zu reduzieren. Grundsätzlich können TIR-Prismen, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, durch eine geeignete Anordnung von Spiegeln ersetzt werden [FLÜG67, LYNC09].

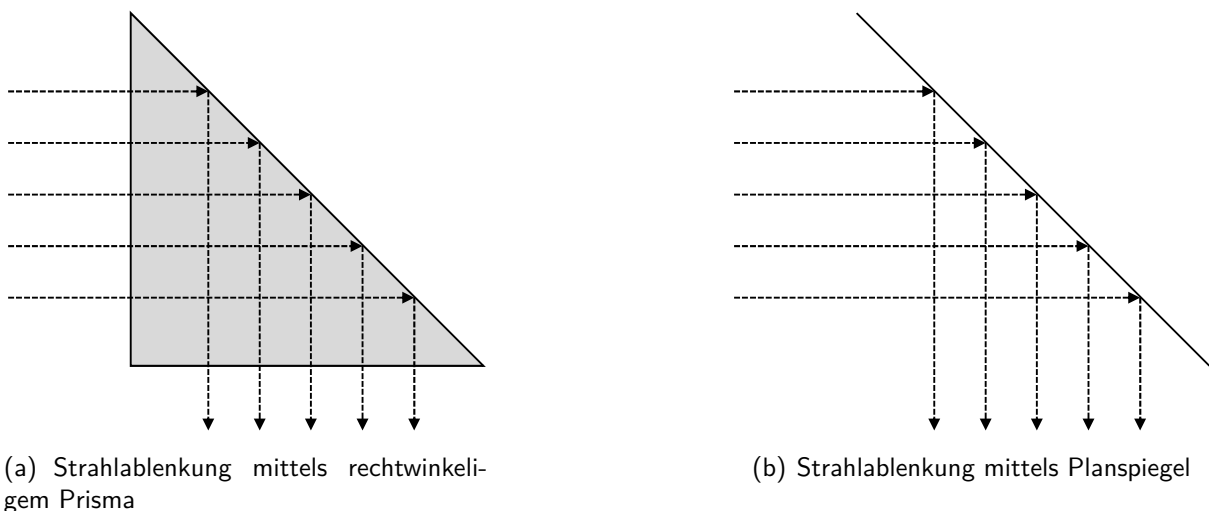


Abbildung 2.12: Optische Elemente zur Strahlablenkung: Prisma und Planspiegel

Spiegel werden für die Reflexion bzw. Ablenkung von Licht eingesetzt und lassen sich hinsichtlich ihrer Form in Plan- und Wölbspiegel unterteilen [GERH16, VOGÉ02]. Weiterhin wird bei Wölbspiegeln zwischen Spiegeln mit konvexer und konkaver Oberflächenform differenziert. Da das Grundprinzip von Spiegeln identisch zu dem von Reflektoren ist, werden im Folgenden lediglich die Vor- und Nachteile von Prismen und Spiegeln diskutiert.

Spiegel können in bestimmten Anwendungsfällen, in denen unter Verwendung von Glasmaterialien eine erhöhte Absorption bestimmter Wellenlängen auftritt bzw. kleinste Inhomogenitäten im Glasmaterial die Absorption begünstigen, vorteilhaft sein [LYNC09]. Der Einsatz mehrerer Spiegel innerhalb eines optischen Systems resultiert jedoch in einem erhöhten Justageaufwand.

Dementsprechend nimmt die Wahrscheinlichkeit von Justagefehlern zu, welches gemäß des Reflexionsgesetzes im ungünstigsten Fall negative Auswirkungen hat. Durch Verwendung eines geeigneten Prismas anstelle mehrerer Spiegel besteht die Möglichkeit auftretende Justagefehler zu reduzieren [LYNC09, NAUM14]. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz eines sogenannten Porro-Prismas im Fernglas. Hierbei handelt es sich um ein Prisma, welches aus zwei rechtwinkligen Prismen (vgl. Abbildung 2.12 (a)) zusammengesetzt ist. Zur Realisierung der gleichen Funktion mittels Planspiegeln ist der Einsatz von vier Planspiegel notwendig. Herausfordernd bei Prismen ist jedoch die auftretende mono- und polychromatische Aberration infolge konvergierender und divergierender Lichtstrahlen, welche auf das Prisma einfallen. Unter Voraussetzung vollständiger Totalreflexion des einfallenden Lichtes liegt die Effizienz von TIR-Prismen bei 100 %, wohingegen handelsübliche Spiegel in der Regel bis zu 92 % erreichen [NAUM14].

2.1.6 Strahlengänge in optischen Systemen

Optische Systeme können in verschiedene Kategorien wie die Anwendung oder Perspektive unterteilt werden. Im Hinblick auf die Anwendung wird häufig zwischen abbildenden und nichtabbildenden Systemen differenziert. Bei der Perspektive erfolgt eine Einteilung in optische Systeme mit hyperzentrischem, entozentrischem und telezentrischem Strahlengang [GRAM27, HAFE03, BEYE16]. Die beiden ersteren werden gemeinhin auch als nicht-telezentrische Strahlengänge bezeichnet.

Optische Systeme mit hyperzentrischem Strahlengang werden bevorzugt in der industriellen Bildverarbeitung beispielsweise zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt [BEYE16]. So können beispielsweise die Außenflächen des in Abbildung 2.13 (a) dargestellten Würfels vermessen werden (Abbildung 2.13 (b)). Optische Systeme mit entozentrischem Strahlengang werden zu meist in der klassischen Fotografie eingesetzt, da diese den natürlichen Seheindruck wiedergeben. Dementsprechend wirkt die näherliegende Stirnfläche des Würfels größer als die entferntere Würfelmrückseite (Abbildung 2.13 (c)).

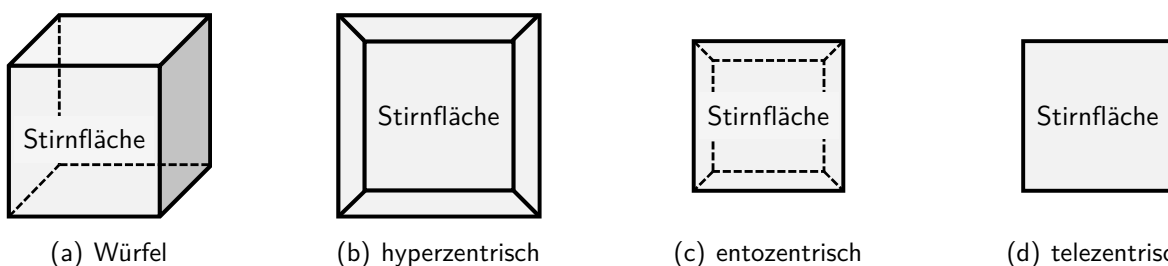


Abbildung 2.13: Vergleich von hyperzentrischer, entozentrischer und telezentrischer Perspektive am Beispiel eines Würfels

Die geringsten Bildabweichungen werden bei optischen Systemen mit telezentrischem Strahlengang erreicht (Abbildung 2.13 (d)), sodass diese primär im Bereich der Video- und Unterhaltungstechnik bei LCD- und DMD-Projektoren eingesetzt werden [Laik07].

Die Telezentrie optischer Systemen resultiert aus der Lage der Aperturblende innerhalb des optischen Systems. Optische Systeme bestehend aus mehreren Linsen sind durch eine objekt- und bildseitige Telezentrie gekennzeichnet, wenn die Aperturblende im Schnittpunkt der jeweiligen Brennweite der vorderen und hinteren Linsengruppe liegt [FLÜG67, SCHU98]. Bei dieser beidseitigen Telezentrie verlaufen sowohl die objektseitigen als auch bildseitigen Hauptstrahlen achsparallel (Abbildung 2.14), wobei die Eintrittspupille (bildseitig) und Austrittspupille (objektseitig) im Unendlichen liegen [DRUD07]. Die Besonderheit der beidseitigen Telezentrie besteht in der Unabhängigkeit des Abbildungsmaßstabes vom Objekt- beziehungsweise Bildabstand [BEYE16]. So resultiert eine Verschiebung des Objektes oder Bildes entlang der optischen Achse zwar in einer Unschärfe, nicht jedoch in einer Änderung des Abbildungsmaßstabes [FLÜG67].

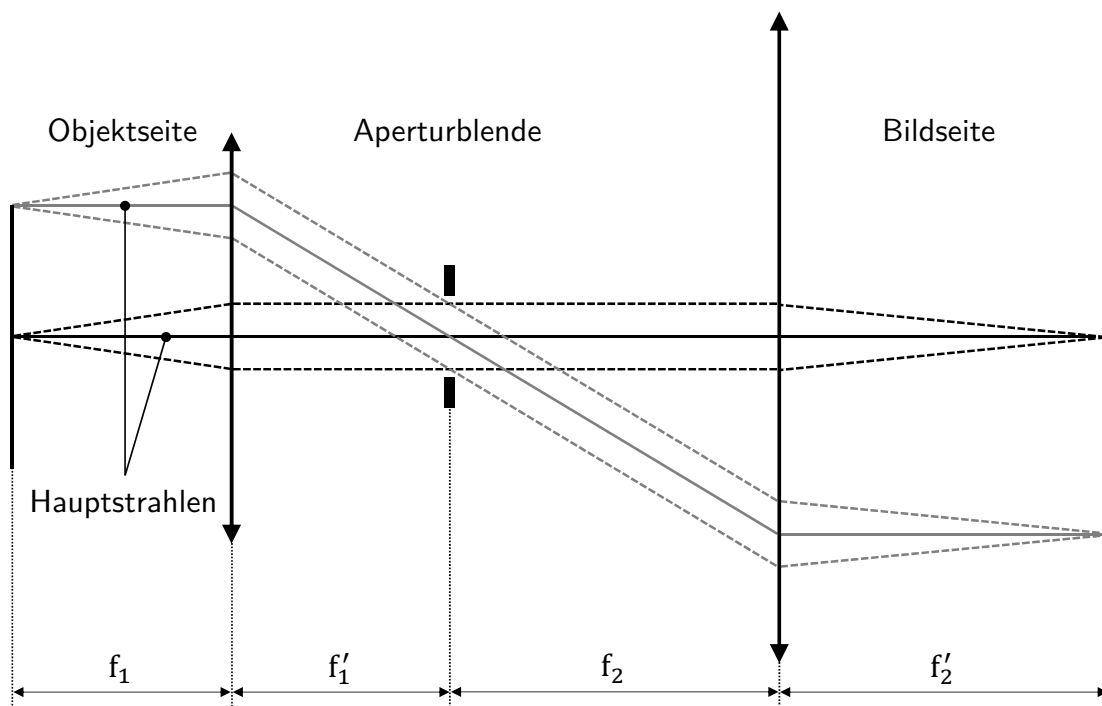


Abbildung 2.14: Optisches System mit telezentrischem Strahlengang (objekt- und bildseitig)

Weisen die Brennebenen beider Linsengruppen keine gemeinsame Schnittebene auf, kann durch Verschieben der Aperturblende in die Brennebene der vorderen Linsengruppe eine objektseitige Telezentrie des optischen Systems erreicht werden. Die objektseitigen Hauptstrahlen verlaufen dabei achsparallel und die auf der Bildseite befindliche Eintrittspupille liegt im Unendlichen [SCHU98]. Die Austrittspupille ist im System eingeschlossen. Umgekehrt resultiert eine

bildseitige Telezentrie durch Verschieben der Aperturblende in die Brennebene der hinteren Linsengruppe, wodurch die bildseitigen Hauptstrahlen einen achsparallelen Verlauf aufweisen. Die Austrittspupille befindet sich dabei objektseitig im Unendlichen und die Eintrittspupille ist im optischen System eingeschlossen.

Wird die Position der Aperturblende so gewählt, dass sie weder im Brennpunkt der vorderen noch der hinteren Linsengruppe liegt, führt dies zu einem optischen System mit einem nicht-telezentrischen Strahlengang. Da in diesem Fall sowohl die Eintritts- als auch Austrittspupille nicht im Unendlichen liegen, weisen die objekt- und bildseitigen Hauptstrahlen keinen achsparallelen Verlauf auf (Abbildung 2.15). Die Lage der Aperturblende sowie der Objektabstand bedingen dabei unterschiedliche Abbildungseigenschaften des optischen Systems.

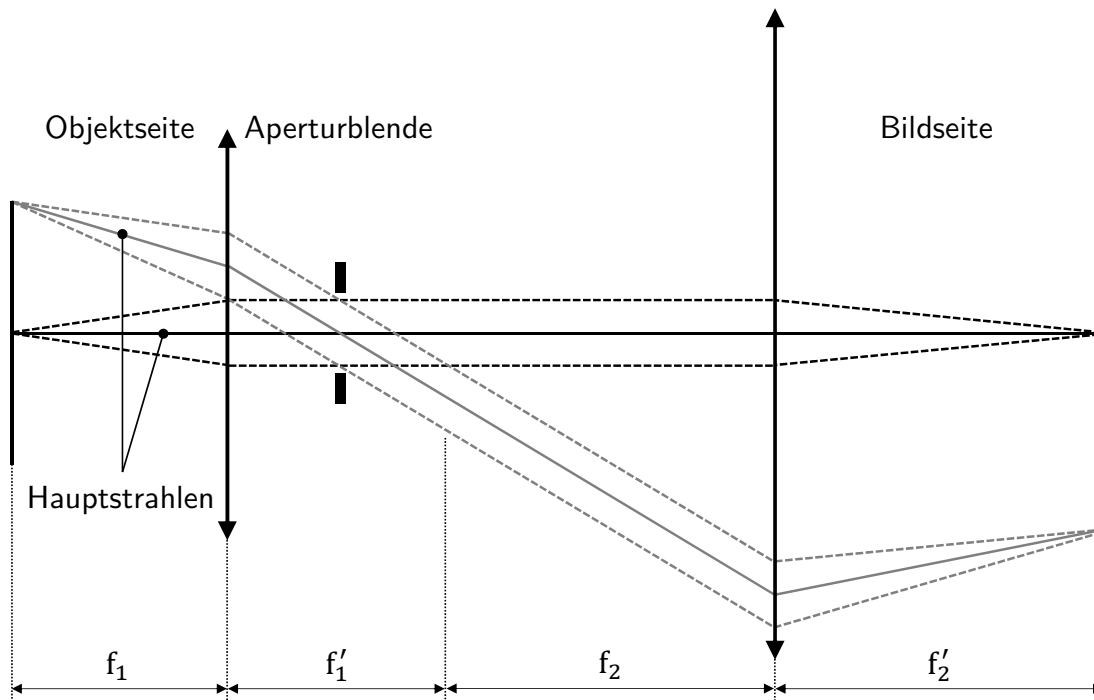


Abbildung 2.15: Optisches System mit nicht-telezentrischem Strahlengang (hyperzentrisch)

Bei hyperzentrischen Systemen liegt die Aperturblende zwischen der vorderen Linsengruppe und deren Brennweite (vgl. Abbildung 2.15). Ferne Objekte scheinen daher größer als nahe Objekte (vgl. Abbildung 2.13 (b)). Umgekehrt wirken ferne Objekte kleiner als nahe Objekte, wenn die Aperturblende zwischen der hinteren Linsengruppe und deren Brennweite angeordnet wird (vgl. Abbildung 2.13 (c)). Die dabei resultierende Entozentrie entspricht dem natürlichen Seheindruck [GRAM27]. In beiden Fällen führt eine Änderung des Objektabstands zu einer Änderung der Bildgröße. Durch Modifikation der Anordnung optischer Elemente innerhalb eines optischen Systems, insbesondere der Aperturblende, besteht somit die Möglichkeit optische Systeme gezielt und anwendungsspezifische anzupassen [LICH17].

2.2 Entwerfen optischer Systeme

Zum Entwerfen einzelner optischer Elemente, wie jenen aus Abschnitt 2.1.5 zur Strahlformung und -ablenkung, aber auch umfänglicher optischer Systeme werden unterschiedliche Werkzeuge und Methoden eingesetzt.

In Abschnitt 2.2.1 wird zunächst auf Strahlverfolgungsprogramme als Werkzeuge eingegangen. Aufbauend auf einer Erläuterung der unterschiedlichen Strahlverfolgungsarten werden anschließend deren primäre Anwendungsbereiche und verschiedenen Merkmale gegenübergestellt.

In Abschnitt 2.2.2 erfolgt eine Übersicht bestehender Methoden zum Entwerfen und Optimieren optischer Systeme aus der Literatur. Die Beschreibung der einzelnen methodischen Schritte im Hinblick auf deren Herangehensweise und Ergebnisse erfolgt dabei objektiv. Die Diskussion der Methoden erfolgt in Kapitel 3.

2.2.1 Werkzeuge

Strahlverfolgungsprogramme als Werkzeuge zum Entwerfen optischer Systeme basieren auf der Annahme, dass die Ausbreitung des Lichts mithilfe der geometrischen Optik beschrieben werden kann. Welleneigenschaften des Lichts wie Interferenz oder Beugung werden vernachlässigt [STOL10]. Bei der Strahlverfolgung werden ausgehend von der Objektseite Lichtstrahlen durch den Optikentwurf bis hin zur Bildseite verfolgt. Die Art der Strahlverfolgung kann dabei grundsätzlich in sequentiell und nicht-sequentiell unterteilt werden.

Bei der **sequentiellen Strahlverfolgung** werden die Lichtstrahlen eines Lichtbündels von der Objektseite durch eine feststehende Reihenfolge optischer Flächen verfolgt, bei der jeder Strahl nur einmal mit jeder Fläche interagiert. Diese vereinfachte Modellierung wirkt sich beim Entwerfen und Optimieren optischer Systeme vorteilhaft auf die Rechenzeit aus, da nur der Schnittpunkt des Strahls mit der nächsten Fläche berechnet wird. Diese Art der Strahlverfolgung wird insbesondere bei abbildenden optischen Systemen eingesetzt [BONE16, HERI06, MICH12].

Bei der **nicht-sequentiellen Strahlverfolgung** besteht keine explizite Reihenfolge der optischen Flächen. Das bedeutet, dass von dem Strahlverfolgungsalgorithmus die Schnittpunkte jeden Strahls mit allen optischen Flächen innerhalb des Optikentwurfs überprüft werden. Die nächste Oberfläche innerhalb des Optikentwurfs, welche von einem Strahl geschnitten wird, ist dabei die Fläche mit der kürzesten Entfernung zum aktuellen Startpunkt des Strahls und dem Schnittpunkt in Ausbreitungsrichtung [STOL10, BONE16]. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis eines der drei folgenden Abbruchkriterien erfüllt wird:

- Von dem Strahl wird keine Fläche mehr getroffen
- Die zugeordnete Strahlleistung hat einen definierten Schwellenwert unterschritten
- Der Strahl hat eine definierte Anzahl an Maximalreflexionen und -brechungen durchlaufen

Um die winkelabhängige Lichtstärkeverteilung einer Lichtquelle simulieren zu können, wird bei der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung die sogenannte Monte-Carlo-Methode verwendet. Bei dieser Methode erfolgt eine Gewichtung der einzelnen Strahlen hinsichtlich ihrer transportierten Lichtleistung. Zur Bestimmung der Lichtquellenintensität werden die einzelnen Lichtleistungen der jeweils auf das Detektorelement einfallenden Strahlen addiert. Die Kombination aus Monte-Carlo-Methode und umfänglicher Strahlverfolgung bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird, haben verglichen mit der sequentiellen Strahlverfolgung einen erhöhten Rechenaufwand und längeren Rechenzeiten bei der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung zur Folge.

In Tabelle 2.3 sind für die jeweilige Strahlverfolgungsart der primäre Anwendungsbereich, Beispiele optischer Systeme und Elemente sowie verschiedene Merkmale zusammengefasst.

Tabelle 2.3: Eigenschaften der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung

	sequentielle Strahlverfolgung	nicht-sequentielle Strahlverfolgung
Primärer Anwendungsbereich	Abbildungsoptik	Beleuchtungsoptik
Optische Systeme und Elemente (Beispiele)	Relaislinsen Teleobjektive	Prismen facettierte Elemente
Merkmale	Vereinfachte Modellierung des Optikentwurfs	Stochastische Variation der Lichtleistung
	Bewertung der Abbildungs- qualität des Optikentwurfs	Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle
	Schnelle Optimierung des Optikentwurfs	Absorptionsverluste in optischen Materialien
	Schnelle Toleranzanalyse des Optikentwurfs	Berücksichtigung von Streu- und Reflexionsstrahlung

Die sequentielle Strahlverfolgung wird primär im Bereich der Abbildungsoptik eingesetzt. So werden unter anderem abbildenden optischen Elemente, wie Relaislinsen die in Mikroskopen oder Fernrohren eingesetzt werden, entworfen [LAIK07]. Beleuchtungsoptiken werden primär mithilfe der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung entworfen. Als optische Elemente sind hier beispielhaft facettierte Elemente wie Reflektoren aber auch Prismen zur Strahlablenkung zu nennen.

2.2.2 Methoden

Für ein zielgerichtetes und effizientes Vorgehen im Entwicklungsprozess werden sowohl in der Produktentwicklung als auch in anderen Bereichen, wie der Optikentwicklung, unterschiedliche Methoden eingesetzt [LIND09]. Die Methode selbst wird dabei durch ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen zur Erreichung einer zielorientierten Problemlösung beschrieben. Der operative Charakter von Methoden, welcher durch die Festlegung einzelner Schritte innerhalb der Methoden sowie deren formalisierte Beschreibung bedingt ist, unterscheidet diese von Vorgehensmodellen [BRAU05]. Bei Vorgehensmodellen werden lediglich die durchzuführenden Schritte beschrieben, wohingegen bei Methoden zusätzlich die Beschreibung der Herangehensweise und Ergebnisse der einzelnen Schritte erfolgt [LIND09]. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass in der Literatur das Wort "Methode" oftmals durch die Wörter "Technik", "Verfahren" und "Vorgehen" gleichgesetzt wird [ESTE08].

Nachfolgend werden verschiedene Methoden zum Entwerfen optischer Systeme aus der Literatur wiedergegeben, welche die Grundlage zur Diskussion der wissenschaftlichen Herausforderungen in Kapitel 3 bilden.

Entwurfsmethode nach Kingslake

Die Entwurfsmethode nach KINGSLAKE [KING10] besteht im Wesentlichen aus drei Schritten (Abbildung 2.16). Beginnend mit dem Aufbau eines ersten Optikentwurfs (in der beschriebenen Arbeit als "optisches System" bezeichnet) wird dieser anschließend einer Leistungsbeurteilung unterzogen. Erfüllt der Optikentwurf die Leistungen endet die Entwurfsmethode. Bei Nichterfüllung müssen Änderungen am Optikentwurf durchgeführt werden, welches den dritten Schritt der Methode beschreibt. Im Anschluss erfolgt eine erneute Leistungsbewertung des Optikentwurfs. Diese Optimierungsschleife wird solange wiederholt, bis die Leistungsbewertung befriedigende Ergebnisse liefert. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Methode kurz erläutert.

Ersten Optikentwurf aufbauen

Für einfache optische Systeme wie einem achromatischen Zweilinsensystem kann ein erster Optikentwurf auf Grundlage anfänglicher Prinzipien durch eine vorgeschriebene Reihenfolge logischer Schritte aufgebaut werden. In den meisten Fällen jedoch erfolgt der Aufbau durch

- eine Ahnung oder Schätzung der konstruierenden Person mit versiertem Konstruktionswissen im Bereich der Optik.

- bereits (selbst) entworfene optische Systeme bzw. einzelne Elemente.
- die Analyse von kommerziell erhältlichen optischen Systemen bzw. Elementen.
- eine Patentrecherche oder aus Nachschlagewerken wie dem Buch *Modern Lens Design* von SMITH [SMIT05].

Leistung des Optikentwurfs bewerten

Die Leistungsbewertung des Optikentwurfs erfolgt mithilfe unterschiedlicher Arten der Strahlverfolgung. Mit fortschreitender Entwurfsqualität ist für eine aussagekräftige Leistungsbewertung die Anzahl der zu verfolgenden Strahlen zu erhöhen. Auf Basis der erhaltenen Strahldaten erfolgt von der konstruierenden Person eine Analyse des Optikentwurfs, beispielsweise im Hinblick auf Abbildungsfehler, der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) oder der Punktspreizfunktion (PSF).

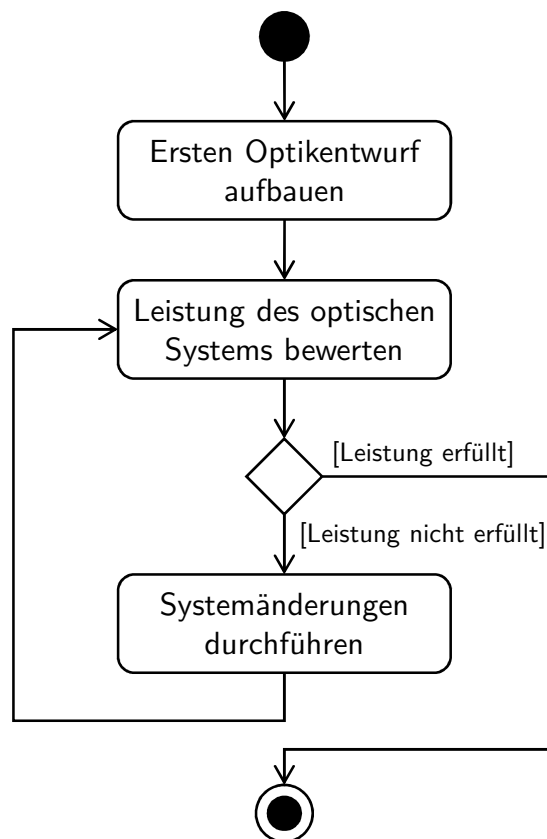


Abbildung 2.16: Methode zum Entwerfen optische Systeme nach [KING10]

Systemänderungen durchführen

Sind auf Grundlage der Leistungsbewertung Änderungen am Optikentwurf durchzuführen, muss die konstruierende Person entscheiden welche Änderungen vorgenommen werden sollen. In den meisten Fällen wird eine geeignete Modifikation des Optikentwurfs

durch kleinere Änderungen von Linsenparametern angestrebt, die anschließend im Hinblick auf ihren Einfluss evaluiert werden müssen.

Entwurfsmethode nach Malacara-Hernández et al.

Die Entwurfsmethode nach MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. [MALA18] ist in die fünf Schritte Optikentwurf erster Ordnung (in der beschriebenen Arbeit als "Systementwurf erster Ordnung" bezeichnet), Optimierung, Toleranzanalyse, Streulichtanalyse und Fertigungsanalyse unterteilt (Abbildung 2.17). Für jeden dieser Schritte werden hinsichtlich des Vorgehens Empfehlungen und Ansätze für den Entwurfsprozess vorgestellt, welche nachfolgend kurz erläutert werden.

Optikentwurf erster Ordnung erstellen

Angefangen mit der Erstellung eines Optikentwurfs erster Ordnung wird unter Berücksichtigung verschiedener lichttechnischer Anforderungen wie photometrischer Größen, der Auflösung oder des Vergrößerungsmaßstabes eine erste Näherung des realen optischen Systems erarbeitet. Weiterhin werden in diesem Schritt die grundlegenden Eigenschaften der einzusetzenden optischen Elemente (Linsen, Spiegel und Prismen), paraxialen Strahlverfolgung, Abbildungsfehleranalyse oder eines bereits vorhandenen Entwurfs einbezogen. Als Grundlage für den Optikentwurf erster Ordnung werden vergleichbare Ansätze wie bei KNIGSLAKE [KING10] angeführt.

Optikentwurf optimieren

Basierend auf dem Optikentwurf erster Ordnung werden im folgenden Optimierungsschritt Variablen wie Linsenradien, -dicken oder Materialparameter identifiziert, welche im Rahmen der Optimierung variiert werden dürfen. Die Festlegung veränderlicher Variablen beruht dabei im Wesentlichen auf den Fähigkeiten und Erfahrungen des Optikingenieurs [MALA18]. Zusätzlich erfolgt die Definition einer sogenannten *Merit Function* (dt. Bewertungsfunktion), teilweise auch *Error Function* genannt, wobei diese an die Anzahl veränderlicher Variablen gekoppelt ist. Das bedeutet, dass je mehr Freiheiten der *Merit Function* zur Optimierung des Optikentwurfs zugewiesen werden sollen, desto mehr veränderliche Variablen sind erforderlich. Dies ist jedoch nicht gleichbedeutend mit dem zwangsweisen Erhalt einer optimalen Lösung für den Optikentwurf, da bei der Optimierung keine Unterscheidung zwischen physikalischen und technischen Parametern erfolgt [MALA18]. In Abhängigkeit des Anwendungsgebiets können die Kriterien zur Optimierung des Optikentwurfs z. B. der Kontrast oder die Winkelabweichung bei der

Erstellung der *Merit Function* variieren. Abschließend wird der Algorithmus zur Optimierung des Optikentwurfs festgelegt.

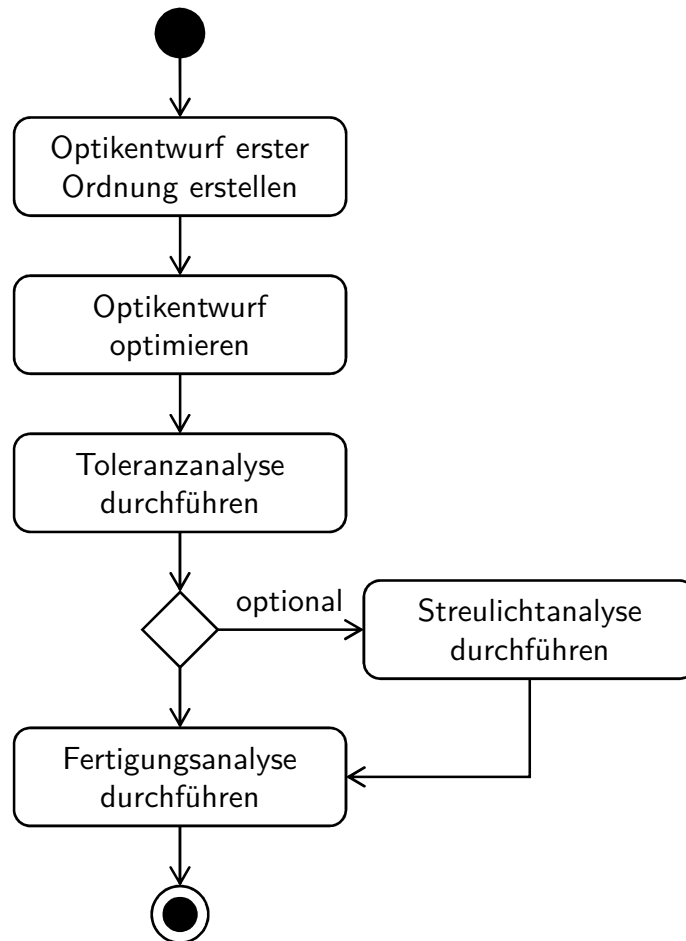


Abbildung 2.17: Methode zum Entwerfen optischer Systeme nach [MALA18]

Toleranzanalyse durchführen

Unter Berücksichtigung von Fertigungs- und Montagetoleranzen erfolgt im Anschluss an die Optimierung eine Toleranzanalyse des Optikentwurfs inklusive mechanischer Aufnahmen. Hierfür wird zunächst ein Toleranzbudget nach SMITH [SMIT00] erarbeitet, in dem auf Grundlage eines Budgets Einflussfaktoren wie Fertigungsrestriktionen und Ausrichtungsfehler der optischen und mechanischen Elemente berücksichtigt und erlaubte Abweichungen festgelegt werden. Bei Überschreitung des Toleranzbudgets müssen individuelle Einflussfaktoren gegebenenfalls stärker restriktiert werden. Daher ist eine genaue Kenntnis über die Wirkung der einzelnen Einflussfaktoren auf den Optikentwurf vorteilhaft.

Streulichtanalyse durchführen

Zur Identifikation potentieller Schwächen im Optikentwurf, welche aufgrund vorgenommener Einschränkungen im Rahmen der sequentiellen Strahlverfolgung auftreten können, ist unter Umständen eine Streulichtanalyse durchzuführen. Im Rahmen der Streulichtanalyse werden dabei alle Quellen, die eine unerwünschte Reduktion der Abbildungsqualität oder des Kontrasts hervorrufen, berücksichtigt und die Menge des Streulichts sowie dessen Strahlengänge (ausgehend von der Quelle) untersucht. In Abhängigkeit des Streulichtumfangs ist die Analyse des Strahlenganges auf optomechanische Komponenten wie Linsenhalterungen oder dem Gehäuse auszuweiten, um konstruktive Änderungen zur Reduktion des Streulichts identifizieren zu können.

Fertigungsanalyse durchführen

Mit dem Ziel die Fertigbarkeit des Optikentwurfs sicherzustellen, erfolgt im finalen Schritt des Entwurfsprozesses eine Fertigungsanalyse. Hierbei werden die eingesetzten Materialien, Fertigungsverfahren und Nachbearbeitungsverfahren für jede Komponenten des Optikentwurfs im Hinblick auf die Fertigbarkeit abgeglichen.

Entwurfsmethode nach Fischer

In der Entwurfs- und Optimierungsmethode nach FISCHER [FISC08] werden grundlegende Schritte, welche im Regelfall bei der Entwicklung optischer Systeme durchlaufen werden, zusammengefasst (Abbildung 2.18). In Abhängigkeit der individuellen Problemstellung bei der Optikentwicklung besteht jedoch die Möglichkeit, dass, verglichen mit den abgebildeten Schritten, ein signifikanter Mehraufwand beim Entwerfen und Optimieren optischer Systeme resultiert [FISC08]. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Methode, welche laut FISCHER ein erfahrener Optikingenieur durchführen muss, kurz erläutert.

Spezifikation überprüfen

In diesem Schritt werden alle notwendigen Anforderungen zur Umsetzung des optischen Systems identifiziert und überprüft. Hierzu zählen insbesondere optische Anforderungen, wie das *Field of View* (dt. Sichtfeld), der Vergrößerungsmaßstab oder die Brennweite.

Startpunkt auswählen

Im Anschluss an die Überprüfung der Spezifikationen wird ein geeigneter Startpunkt für den Optikentwurf gewählt. In Abhängigkeit der Erfahrung kann hier bei einfachen optischen Systemen ein vollständiger Neuentwurf als Startpunkt gewählt werden. Bei komplizierten optischen Systemen eignen sich als Ansatz verschiedene Quellen wie Pa-

tente oder das Buch *Modern Lens Design* von SMITH [SMIT05], welches schon zuvor bei KINGSLAKE als Quelle herangezogen wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination bewährter Optikentwürfe, beispielsweise einer abbildenden und einer verzeichnenden Linse. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass mithilfe des gewählten Ansatzes ein Optikentwurf realisiert werden kann, welcher zur Erfüllung der zuvor definierten Spezifikationen führt.

Variablen und Restriktionen aufstellen

Ist ein geeigneter Startpunkt ausgewählt worden, erfolgt die Festlegung von Variablen und Restriktionen innerhalb der Software zur Optiks simulation. Zu den Variablen gehören unter anderem Linsenradien und -dicken sowie die Abstände der einzelnen optischen Elemente zueinander. Die Restriktionen werden beispielsweise durch Brennweiten, Blendenzahl und Wellenlänge(n) beschrieben [FISC08]. Grundsätzlich sind in der frühen Entwurfsphase des optischen Systems eine limitierte Anzahl veränderlicher Variablen und die Festlegung optischer Materialeigenschaften für die spätere Optimierung vorteilhaft. Weiterhin ist die Änderung von Radien und Dicken im Rahmen der Optimierung, insbesondere unter Berücksichtigung der Fertigbarkeit, auf sinnvolle Werte zu begrenzen.

Merit Function festlegen

Auf Grundlage der aufgestellten Variablen und Restriktionen wird die *Merit Function* (in der beschriebenen Arbeit als "*Error Function*" bezeichnet) festgelegt. Hierbei kann sich in den meisten Fällen einer voreingestellten *Merit Function* bedienen oder eine benutzerdefinierte *Merit Function* erstellt werden.

Optikentwurf optimieren

Basierend auf den Spezifikationen, dem ausgewählten Startpunkt, den aufgestellten Variablen und Restriktionen sowie der festgelegten *Merit Function* erfolgt die Optimierung des Optikentwurfs. Dabei kann der Optimierungsprozess in Abhängigkeit der Komplexität des Optikentwurfs, der Anzahl zu verfolgender Strahlen, dem *Field of View* und weiteren Kriterien zwischen einigen Sekunden und mehreren Stunden dauern.

Leistung des Optikentwurfs bewerten

Im Anschluss an die Optimierung wird die Leistung des Optikentwurfs anhand der MTF, dem RMS-Punktradius, der Verzeichnung und weiterer Kriterien bewertet. Bei Nichterfüllung der gestellten Leistungsanforderungen müssen erneut Variablen und Restriktionen aufgestellt, die *Merit Function* festgelegt und eine Optimierung des Optikentwurfs durchgeführt werden. Diese Schleife wird so oft durchlaufen, bis die Leistungsanforderungen erfüllt werden oder die Maßnahmen im nachfolgenden Schritt durchgeführt werden.

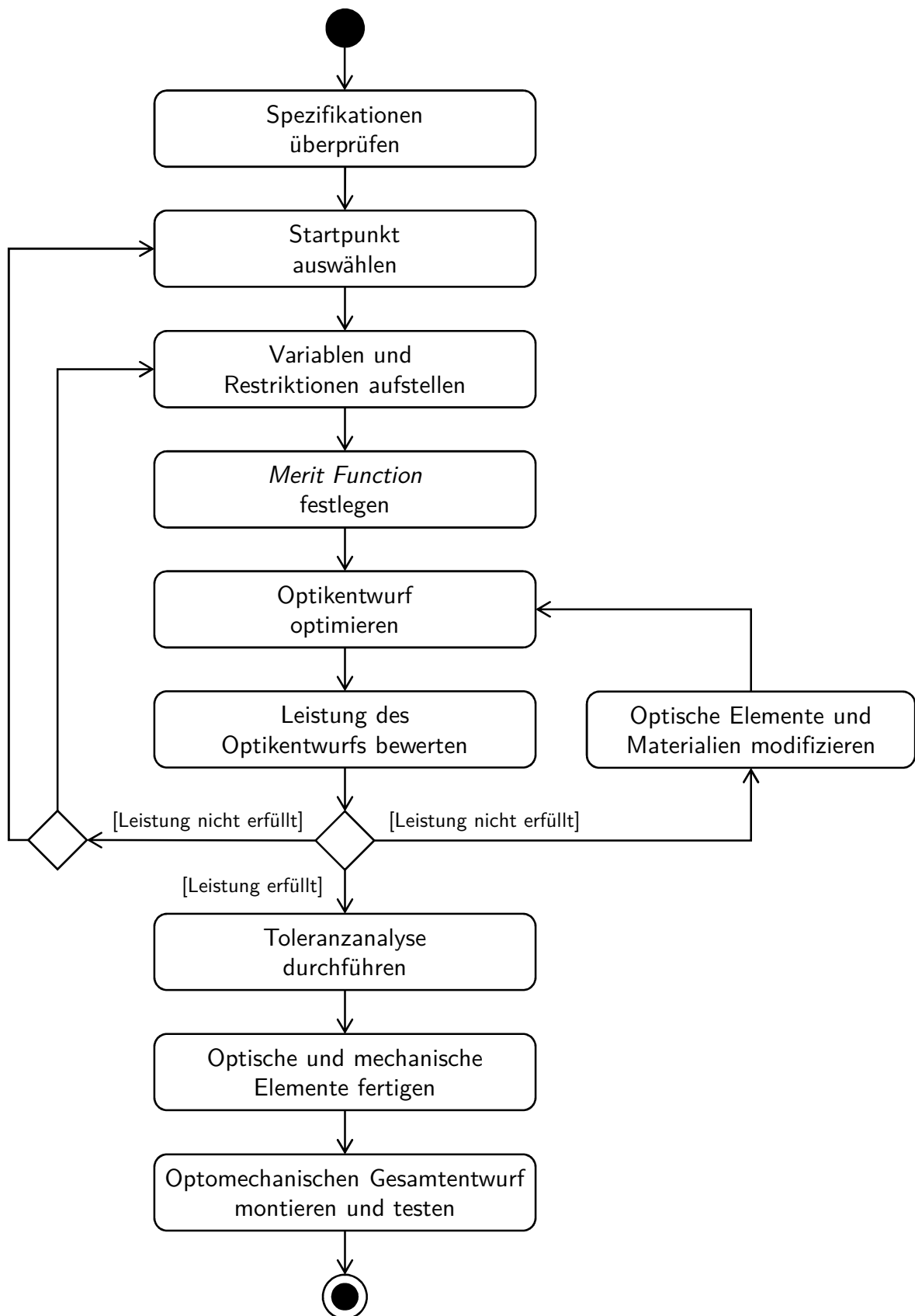


Abbildung 2.18: Methode zum Entwerfen und Optimieren optischer Systeme nach [FISC08]

Optische Elemente und Materialien modifizieren

Können die gestellten Leistungsanforderungen nicht mit dem erstellten Optikentwurf erfüllt werden, ist unter Umständen die Anzahl optischer Elemente zur Aufteilung der Brechkraft oder die Materialeigenschaft einzelner optische Elemente zu modifizieren. Falls trotz der Modifikationen die Leistungsanforderungen noch immer nicht erfüllt werden können, ist zum Schritt "Startpunkt auswählen" zurückzukehren.

Toleranzanalyse durchführen

Die Toleranzanalyse wird unter Berücksichtigung resultierender Kosten zur Sicherstellung der geforderten optischen Leistung des optomechanischen Gesamtentwurfs durchgeführt. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Toleranzanalyse allen optischen und mechanischen Elementen Toleranzen zugewiesen. In Abhängigkeit der Empfindlichkeit und der geforderten Leistung des Optikentwurfs sind hierfür geeignete Toleranzen zu wählen. Auch wenn die Toleranzanalyse der letzte Schritt beim Entwerfen optischer Systeme ist, ist die Empfindlichkeit des optomechanischen Gesamtentwurfs gegenüber Toleranzen über den gesamten Entwurfsprozess hinweg zu überwachen. Nur so können in der frühen Entwurfsphase Maßnahmen für einen weniger sensitiven Optikentwurf ergriffen werden.

Optische und mechanische Elemente fertigen

Mit Finalisierung des Optikentwurfs erfolgt die Fertigung aller optischen und mechanischen Elemente. Hierbei ist die Kontaktaufnahme mit einem geeigneten Optikhersteller und Konstrukteur für die mechanischen Elemente erforderlich. Ähnlich der Toleranzanalyse ist auch der Entwurf der mechanischen Elemente wie Halterungen und Aufnahmen über den gesamten Entwurfsprozess hinweg zu überwachen, um ein optimales Zusammenspiel des finalen optomechanischen Gesamtsystems zu erreichen. Weiterhin ist während der Herstellung der optischen Elemente über den gesamten Herstellungsprozess hinweg ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit dem Hersteller sicherzustellen, um rechtzeitig auf Änderungen wie der Modifikation optischer Materialien reagieren zu können.

Optomechanischen Gesamtentwurf montieren und testen

Im Anschluss an die Fertigung der optischen und mechanischen Elemente ist eine entsprechend der Leistungsanforderungen präzise Montage des optomechanischen Gesamtentwurfs erforderlich. Korrelierend mit den Anforderungen und Spezifikationen an das optische System ist das Testen des optomechanischen Gesamtentwurfs nach geeigneten Kriterien durchzuführen. In Abhängigkeit der Kriterien sind hierfür einfache Testcharts

wie das USAF-Chart bis hinzu aufwendigeren Untersuchungen wie der MTF durchzuführen.

Weitere Entwurfsmethoden

Abgesehen von den hier beispielhaft aufgeführten Methoden zum Entwerfen und Optimieren optischer Systeme existieren in der Literatur noch weitere. So werden beispielsweise auch von GROSS [GROS07] und VELZEL [VELZ14] vergleichbare Ansätze zum Entwerfen und Optimieren optischer Systeme thematisiert.

GROSS [GROS07] gliedert seine Methode zum Entwerfen optischer Systeme in fünf Phasen mit dem Hinweis, dass diesen in Realität Abweichungen unterliegen. Jede Phase ist dabei durch verschiedene Schritte gegliedert.

In der ersten Phase erfolgt die Definition von Anforderungen und Spezifikationen an den Optikentwurf sowie die Festlegung von Randbedingungen und der *Merit Function*. Anschließend wird in der Phase des Erstentwurfs ein sogenannter Startentwurf ermittelt und eine grobe Optimierung durchgeführt. Die Erreichbarkeit der zuvor definierten Anforderungen wird in der nachfolgenden Orientierungsphase überprüft. Für den Fall, dass die anfänglich definierten Anforderungen nicht erreicht werden, ist über eine Schleife zum Startentwurf zurückzukehren, welcher durch strukturelle Änderungen und anpassen der Anforderungen überarbeitet wird. Werden durch eine erneute Groboptimierung die angepassten Anforderungen erfüllt, erfolgt in der nächsten Phase eine ausführliche Optimierung des Erstentwurfs mithilfe einer präzisierten *Merit Function*. Im Anschluss an die ausführliche Optimierung werden die zu erreichenden Anforderungen erneut überprüft. Bei einer Nichterfüllung der Anforderungen erfolgt über eine Schleife die Anpassung von Entwurfszielen und dem Entwurf. Erfüllt der Optikentwurf die Anforderungen wird mit der letzten Entwurfsphase fortgefahren, in der eine finale Bemessung relevanter Einflussgrößen auf den Optikentwurf erfolgt. Hierzu zählen beispielsweise Kosten, Toleranzen und Streulicht.

Die Entwurfsmethode nach VELZEL [VELZ14] ist in die sechs Schritte Spezifikation, Anordnung, Vorentwurf, Oberflächenmodell, Optimierung und Tolerierung eingeteilt. Im Rahmen der Spezifikation erfolgen die Klärung und Präzisierung der Anwendung für das zu entwerfende optische System sowie der Eignung optischer Elemente zur Strahlformung. Im zweiten Schritt werden die einzusetzenden optischen Elemente zur Strahlformung sowie deren Anordnung und Abstände zueinander festgelegt. Basierend auf der Annahme dünner optischer Elemente erfolgt im dritten Schritt ein Vorentwurf des optischen Systems. Das anschließende Oberflächenmodell der Entwurfsmethode dient zur Korrektur der vereinfachten Annahmen des Vorentwurfs.

Dabei werden die einzelnen Dicken der optischen Elemente sowie die Einflüsse der Oberflächen auf Abbildungsfehler im Oberflächenmodell berücksichtigt. Grundlage des anschließenden Optimierungsschritts ist ein "zuversichtlicher" Vorentwurf, von dem nach der Optimierung im Idealfall die eingangs definierten Spezifikationen bestmöglich erfüllt werden. Dies wird unter anderem mithilfe der PSF, der MTF oder auftretenden Abbildungsfehlern überprüft. Mit dem Ziel zulässige Abweichungen der einzelnen optischen Elemente hinsichtlich Krümmung, Dicke, Zentrierung, Verkippung und weiteren Einflussgrößen festzulegen, erfolgt im letzten Schritt der Entwurfsmethode die Tolerierung des Optikentwurfs.

2.3 Fahrzeuglichttechnik

Lichtsysteme im Bereich der Fahrzeugfrontbeleuchtung werden seit einigen Jahren einer einzigartigen Veränderung unterzogen. Anfänglich sind konventionelle Scheinwerfersysteme, bei denen zur Lichterzeugung eine Gasentladungslampe und zur Lichtformung ein Reflektor oder eine Linse eingesetzt werden, durch LED-basierte Systeme mit mehreren Linsen ersetzt worden. Aktuell werden verstärkt Anstrengungen unternommen die Auflösung dieser Systeme durch den Einsatz der LCD-, LCoS- und DMD-Technologie zu erhöhen, um eine Steigerung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts zu erreichen. Dies führt unweigerlich zu einer Zunahme der Komplexität dieser Lichtsysteme.

Im folgenden Abschnitt werden allgemeine Anforderungen an Lichtverteilungen für die Fahrzeugfrontbeleuchtung vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.3.2 eine Übersicht zu verschiedenen Entwicklungen hochauflösender Lichtsysteme unter Verwendung der DMD-Technologie für die Fahrzeugfrontbeleuchtung.

2.3.1 Lichtverteilungen

Auf Grundlage des 1958 geschlossenen Übereinkommens der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) sind in den vergangenen Jahrzehnten mehrere technische Vorschriften für Kraftfahrzeuge harmonisiert und in verschiedenen Regelungen festgehalten worden. Zu den Harmonisierungen zählt unter anderem die Vereinheitlichung zur Genehmigung von Kraftfahrzeugen und deren Ausrüstungsgegenständen. Scheinwerfer als Ausrüstungsgegenstand für die Fahrzeugfrontbeleuchtung unterliegen demzufolge ebenfalls bestimmten Regelungen und werden entsprechend photometrischer Vorschriften klassifiziert [ECE113]. Weiterhin lassen sich diesen Klassen nach § 5.3.1 der ECE-Regelung 113 [ECE113] unterschiedliche Technologien zur Lichterzeugung zuordnen.

Im Hinblick auf Abblend- und Fernlichtverteilungen (Abbildung 2.19) zur Ausleuchtung des Verkehrsraumes sind die ECE-Regelung 112 [ECE112] für asymmetrische und die ECE-Regelung 113 [ECE113] für symmetrische Lichtverteilungen relevant. Darüber hinaus werden weitere einheitliche Bedingungen für adaptive Frontbeleuchtungssysteme in der ECE-Regelung 123 [ECE123] beschrieben. Im Folgenden wird auf Basis dieser ECE-Regelungen und der LED-Technologie zur Lichterzeugung auf ausgewählte photometrische Werte innerhalb von Abblend- und Fernlichtverteilung eingegangen.

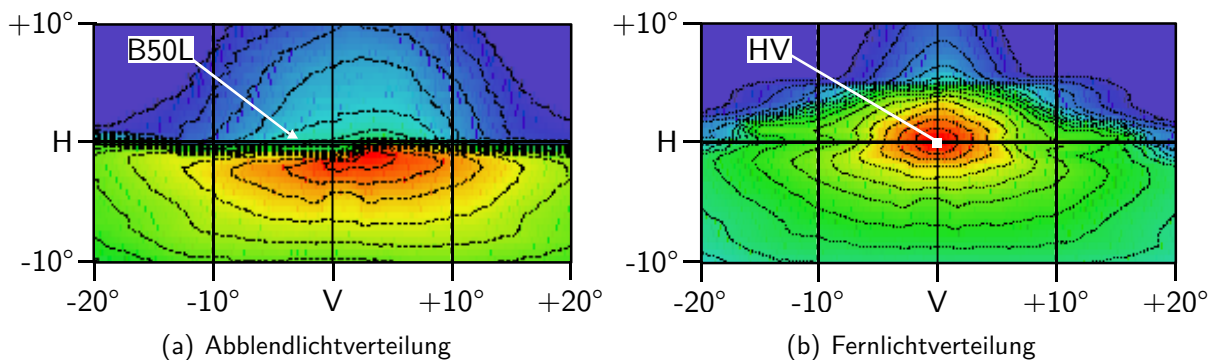


Abbildung 2.19: Abblend- (a) und Fernlichtverteilung (b) auf einer Wand in 25 m Entfernung

Zur Erzeugung einer Abblendlichtverteilung werden in § 5.14. der ECE 123 sowie in § 5.3.2.3. der ECE 112 für den Gesamtlichtstrom eines einzelnen Scheinwerfers mindestens 1.000 lm gefordert. Ferner lassen sich dem Anhang 3 der ECE 123 weitere photometrische Vorschriften für das Abblendlicht entnehmen. So wird für die maximale Beleuchtungsstärke E_{Max} in 25 m Entfernung ein Wert von 127 lx angegeben. Im Punkt B50L, der die Position des Fahrerkopfes eines entgegenkommenden Fahrzeugs repräsentiert, ist bei gleicher Entfernung eine Beleuchtungsstärke von 0,5 lx nicht zu überschreiten.

Für eine Fernlichtverteilung werden in den ECE-Regelungen keine Grenzen für den Gesamtlichtstrom definiert. In § 6.3.1. der ECE 113 bzw. § 6.3.2.1.1. der ECE 123 wird im Schnittpunkt HV der Fernlichtverteilung (vgl. Abbildung 2.19 (b)) E_{Max} mit 344 lx in 25 m Entfernung nach oben begrenzt.

Weiterhin wird in § 5.15. der ECE 48 [ECE48] das von Scheinwerfern abgestrahlte Licht zur Erzeugung einer Abblend- und Fernlichtverteilung als "weiß" festgelegt. Die Definition "weißen" Lichts erfolgt in § 2.29.1 durch Angabe von Farbwertanteile auf Basis der CIE-Normfarbtafel.

2.3.2 Hochauflösende Scheinwerfersysteme

Erste Ansätze zur Nutzung der DMD-Technologie für die Umsetzung von Lichtfunktionen wurden bereits im Jahr 2001 diskutiert [ENDE01]. Hochauflösende Lichtsysteme werden hier, neben den konventionellen Frontbeleuchtungssystemen, als zusätzliche Einheiten zur Erzeugung einer bedarfsgerechten Ausleuchtung spezifischer Bereiche mit höherer Lichtintensität angesehen. Als potenzielle Lichtfunktionen, welche mit einem solchen System realisiert werden können, werden beispielsweise die Projektion von Informationen auf die Straße, das Ausblenden von Objekten und eine Leuchtweitenregulierung genannt.

Im Nachfolgenden werden kurz Entwicklungsfortschritte hochauflösender Lichtsysteme unter Verwendung der DMD-Technologie vorgestellt und abschließend in tabellarischer Form (Tabelle 2.4) zusammengefasst.

ROSLAK [ROSL05] stellt in seiner Arbeit einen Konzeptscheinwerfer zur Erprobung neuer Lichtfunktionen vor. Bedingt durch dessen abweichende Größe von konventionellen Scheinwerfern wird dieser nicht im Fahrzeug integriert sondern auf einem Rack vor dem Fahrzeug befestigt. Damit auf der aktiven Modulatorfläche des DMDs eine hohe Beleuchtungsstärke erzeugt wird, erfolgt der Einsatz einer 200 W Ultra-Hochdruckentladungslampe zur Lichterzeugung. In einer Entfernung von 25 m wird eine maximale Beleuchtungsstärke von 100 lx erzeugt. Der horizontale Öffnungswinkel des FOV wird mit $\pm 14,5^\circ$ angegeben, wodurch bei einer Abblendlichtverteilung ein Gesamtlichtstrom von mehr als 1.100 lm beziehungsweise von mehr als 1.700 lm bei einer Fernlichtverteilung erreicht wird. Bei Abblendlicht wird ein Systemwirkungsgrad von 8,2 % erreicht.

KAUSCHKE [KAUS06] entwickelt in seiner Arbeit zwei DMD-basierte Scheinwerferprototypen. Analog zu Roslak ist die erste Generation des DMD-Scheinwerfers vor dem Fahrzeug auf einem Rack befestigt, um die generierten Lichtverteilungen unter dynamischen Bedingungen evaluieren zu können. Für die Lichterzeugung und zur Beleuchtung des DMDs wird eine Gasentladungslampe mit einem Lampenlichtstrom von 22.000 lm eingesetzt, wodurch eine maximale Beleuchtungsstärke von 106 lx erreicht wird. Das FOV des Systems wird mit circa $\pm 15^\circ$ horizontal und circa $\pm 10^\circ$ vertikal ausgewiesen. Der Gesamtlichtstrom einer Abblendlichtverteilung ist mit 1.150 lm angegeben und der Gesamtlichtstrom einer Fernlichtverteilung mit 1.760 lm. Die Systemeffizienz bei Abblendlicht wird mit 8,2 % angegeben, welche bei Fernlicht auf 12,6 % gesteigert werden kann.

Die zweite Generation des DMD-Scheinwerfers wurde in das Seriengehäuse eines 5er BMW integriert. Auch hier erfolgt der Einsatz einer Gasentladungslampe, jedoch mit einem reduzierten Lampenlichtstrom von 14.000 lm. Aufgrund des reduzierten Ausgangslichtstromes wird auch

E_{Max} auf 53 lx reduziert. Weiterhin erfolgt eine Reduktion des Gesamtlichtstroms der Abblend- und Fernlichtverteilung auf 642 lm bzw. 1.370 lm. Zusätzlich resultiert bei der zweiten Generation eine Abnahme der Systemeffizienz. Bei einer Abblendlichtverteilung verringert sich der Wirkungsgrad des Systems auf 4,6 % und bei der Fernlichtverteilung auf 9,8 %.

GÜNTHER [GÜNT10] entwickelt aufbauend auf den Arbeiten von Roslak und Kauschke unter Verwendung einer Gasentladungslampe und eines 0,7" DMD ein Labormuster. Zur Ermittlung notwendiger Beleuchtungsstärken im Punkt HV und dem Punkt B50L (vgl. Abbildung 2.19) führt Günther Probandenstudien durch. Die Probandenstudien führen zu dem Ergebnis, dass im Punkt HV eine Beleuchtungsstärke von 100 – 150 lx ausreichend ist. Gleichzeitig darf im Punkt B50L die Beleuchtungsstärke einen Wert von 0,5 lx nicht überschreiten, um eine Blendung des entgegenkommenden Verkehrs zu vermeiden. Mit einem Lampenlichtstrom von 4.200 lm wird von dem Labormuster in einer Entfernung von 25 m eine maximale Beleuchtungsstärke von 13 lx erzeugt. Die gemessene Beleuchtungsstärke im Punkt B50L wird mit 1,3 lx angegeben.

LEE ET AL. [LEE11] haben auf der ISAL 2011 erstmalig ein in einem Fahrzeugscheinwerfer integriertes Projektionsmodul vorgestellt. Für die Integration des DMD-basierten Projektionsmoduls wurde lediglich das Abblendlichtmodul aus dem Fahrzeugscheinwerfer entfernt. Als Lichtquelle erfolgt der Einsatz einer D1S-Gasentladungslampe mit einem Ellipsoidreflektor. Nach ECE-Regelung 99 [ECE99] darf dieses Leuchtmittel einen Lichtstrom von 3.200 lm mit einer Toleranz von ± 450 lm aufweisen. Das von der Lichtquelle emittierte und anschließend vom Reflektor fokussierte Licht wird unter Verwendung eines Faltspiegels auf einen 0,7" DMD gelenkt. Das Projektionssystem besteht aus sechs Linsen, wobei die einzelnen Linsen verschiedene Funktionen wie die Korrektur von Aberrationen, Steigerung der Beleuchtungsstärke und Anpassung des FOVs erfüllen. Mithilfe des Projektionssystems wird ein horizontaler Öffnungswinkel von annähernd $\pm 15,6^\circ$ erreicht. Um jedoch eine ECE-konforme Lichtverteilung zu realisieren, ist der Einsatz einer weiteren D1S-Gasentladungslampe mit einem zusätzlichen optischen System erforderlich. Als Grund hierfür wird die geringe Effizienz des DMD mit 68 % angeführt.

MICHENFELDER [MICH14] entwickelt in seiner Arbeit basierend auf Videoprojektoren einen Forschungsscheinwerfer. Für die Umsetzung werden je drei Videoprojektoren in zwei Reihen auf einem Rack vor dem Versuchsfahrzeug montiert. Um gemäß den ECE-Regelungen in definierten Bereichen der Lichtverteilung die Anforderungen zu erfüllen, werden die einzelnen Lichtverteilungen der Videoprojektoren überlagert. Um den Nahfeldbereich abzudecken und eine typische Abblendlichtverteilung generieren zu können, werden die drei Videoprojektoren der unteren Reihe verwendet. Die oberen drei Projektoren werden primär für die Realisierung

einer vertikalen Hell-Dunkel-Grenze (vHDG) sowie für das Markierungslicht eingesetzt. Infolge der Überlagerung wird im Horizontalen ein Winkelbereich von $\pm 32^\circ$ sowie $+11^\circ$ bis -14° im Vertikalen abgedeckt. E_{Max} wird mit 259 lx und der emittierte Gesamtlichtstrom aller sechs Projektoren mit 30.000 lm angegeben.

BHAKTA ET AL. [BHAK15] stellten auf der ISAL 2015 einen DMD-basierten Scheinwerferprototyp vor, welcher als Lichtquelle mit einer LED der Firma Osram bestückt ist. Das optische System des Scheinwerfers basiert auf einer nicht-telezentrischen Architektur, bei der der DMD unter einem Winkel von $34,5^\circ$ von dem Beleuchtungssystem beleuchtet wird. Das Beleuchtungssystem besteht aus drei Linsen. Die ersten beiden Linsen dienen als Sammel- und Kollimationsoptik. Die dritte Linse wird zur Strahlformung auf die aktive Modulatorfläche des DMD eingesetzt. Das Projektionssystem wiederum ist aus einem Fünflinsensystem aufgebaut, welches sich aus einem Achromat zur Reduktion chromatischer Aberration sowie einer zylindrischen Linse und einer anamorphen Asphäre zur Anpassung des Seitenverhältnisses zusammensetzt. Die maximale Beleuchtungsstärke des Prototyps wird mit 705 lx in einer Entfernung von 6 m angegeben, welches nach dem photometrischen Entfernungsgesetz in 25 m circa 40,6 lx entspricht. Das FOV wird mit 20° horizontal und 6° vertikal ausgewiesen, in dem ein Lichtstrom von 500 lm emittiert wird.

SCHLÖDER ET AL. [SCHL18] stellen auf der SIA VISION 2018 das DMD-Scheinwerfermodul, welches im Scheinwerfer der Mercedes-Maybach S-Klasse eingesetzt wird, vor. Zur Beleuchtung des 0,55" DMDs werden drei Hochstrom-LEDs mit einer Emissionsfläche von jeweils 2 mm^2 eingesetzt. Das von den LEDs emittierte Licht wird unter Verwendung einer Beleuchtungsoptik kollimiert und auf einen Reflektor gelenkt. Die Reflektorgeometrie ist dabei für eine homogene Ausleuchtung des DMDs entworfen. Zur Projektion in den Verkehrsraum wird ein aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigtes Dreilinsensystem eingesetzt, bei dem die optischen Funktionsflächen der letzten Linse $30 \times 50 \text{ mm}^2$ messen. Das von dem Projektionssystem homogen ausgeleuchtete FOV ist mit 14° horizontal und 7° vertikal angegeben. Innerhalb des FOV wird bei einem Gesamtlichtstrom von 1.000 lm eine maximale Beleuchtungsstärke von über 90 lx erreicht. Auf die Effizienz des optischen Systems wird nicht eingegangen.

UHLENBERG ET AL. [UHLE19] haben auf der IFAL 2019 ein hochauflösendes Projektionsmodul vorgestellt, welches bereits erfolgreich Stoß- und Schwingungsversuche unterzogen wurde und für die Serienproduktion einsatzbereit ist. Als Lichtquelle werden zwei Osram Oslon® HX LEDs eingesetzt, wobei beide LEDs ein eigenes optisches System zur Beleuchtung des 0,55" DMDs haben. Mithilfe des Beleuchtungssystems, welches aus jeweils drei Linsen aufgebaut ist,

wird der von den LEDs emittierte Lichtstrom auf einen Faltspiegel gelenkt, von dem wiederum das Licht auf den DMD reflektiert wird. Der Gesamtlichtstrom beider LEDs wird mit 3.400 lm angegeben. Zur Reduktion von Streustrahlung im optischen System wird zwischen dem DMD und der ersten Linse des Projektionssystems eine Blende eingesetzt. Das Projektionssystem ist aus drei Glaslinsen aufgebaut, wobei die dritte Linse einen Durchmesser von 40 mm hat. Mithilfe des Projektionssystems wird die Ausleuchtung eines FOV von $\pm 8^\circ$ horizontal und $\pm 4^\circ$ vertikal ermöglicht, in den ein Lichtstrom von 1.060 lm emittiert wird. Der Wirkungsgrad des optischen Systems entspricht somit 31,2 %. Im Punkt HV wird die maximale Beleuchtungsstärke E_{Max} mit 90,5 lx angegeben.

HANSEN [HANS19] entwickelt in seiner Arbeit eine Remote-Laser-Lichtquelle für die Beleuchtung eines DMDs zur Umsetzung eines hochauflösenden Scheinwerfersystems. Die Remote-Laser-Lichtquelle basiert auf einem Faserkoppler, mit dem die emittierte Strahlung von drei Laserdioden zu einer Ausgangsfaser kombiniert wird. Die ausgekoppelte Strahlung wird anschließend unter Verwendung eines facettierten Freiformreflektors homogenisiert und auf den DMD gelenkt. Am Faserausgang der Lichtquelle wird ein Gesamtlichtstrom von 13.880 lm erreicht. Mithilfe des Freiformreflektors werden 10.720 lm auf den DMD reflektiert, welches einem Wirkungsgrad von etwa 77 % entspricht. Da in dieser Arbeit primär die Entwicklung einer Remote-Laser-Lichtquelle zur Beleuchtung eines DMD untersucht wird, erfolgt keine Realisierung eines Projektionssystems. Um dennoch den potentiell erreichbaren Wirkungsgrad eines Gesamtsystems abschätzen zu können, erfolgt die Vermessung einer Referenzoptik der Firma Texas Instruments. Basierend auf dem gemessenen Wirkungsgrad des Vierlinsensystems zur Projektion erfolgt, unter der Annahme einer homogenen Beleuchtungsstärkeverteilung, die Abschätzung der maximal erreichbaren Beleuchtungsstärke E_{Max} für verschiedene FOV. Bei einem horizontalen Öffnungswinkel von 39° und einem vertikalen Öffnungswinkel von 15° wird eine maximale Beleuchtungsstärke von 48 lx errechnet.

Tabelle 2.4: Übersicht hochauflösender Scheinwerfer mit DMD-Technologie

Jahr	Wer	Art der Lichtquelle	Lichtstrom Lichtquelle [lm]	DMD Format ["]	FOV h x v [°]	Lichtstrom Abblendlicht [lm]	Lichtstrom Fernlicht [lm]	E _{Max} in HV [lx]	Wirkungsgrad Lichtverteilung [%]
2005	Roslak	Gasentladungslampe	-/-	-/-	29 x -/-	> 1.100	> 1.700	> 100	8,2 (Abblendlicht)
2006	Kauschke	Gasentladungslampe	22.000	-/-	30 x 20	1.150	1.760	106	8,2 (Abblendlicht) 12,6 (Fernlicht)
2006	Kauschke	Gasentladungslampe	14.000	-/-	30 x 20	642	1.370	53	4,6 (Abblendlicht) 9,8 (Fernlicht)
2010	Günther	Gasentladungslampe	4.200	0,70	-/-	-/-	-/-	13	-/-
2011	Lee	Gasentladungslampe	3.200	0,70	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
2014	Michenfelder	Gasentladungslampe	-/-	-/-	64 x 25	30.000	-/-	259	-/-
2015	Bhakta	LED	-/-	0,30	20 x 6	-/-	-/-	40,6 (berechnet)	-/-
2018	Schlöder	LED	-/-	0,55	14 x 7	1.000	-/-	>90	-/-
2019	Uhlenberg	LED	3.400	0,55	16 x 8	1.060	-/-	90,5	31,2
2019	Hansen	Laser	13.200	0,55	39 x 15	5.560	-/-	48 (berechnet)	40,78 (berechnet)

3 Wissenschaftliche Herausforderungen

Basierend auf dem Stand der Wissenschaft werden in diesem Kapitel die wissenschaftlichen Herausforderungen dieser Arbeit hergeleitet und in drei Forschungsfragen formuliert. Hierfür werden zunächst Kriterien aufgestellt die nach Meinung des Verfassers von einer Entwurfsmethode erfüllt müssen, um damit hochauflösende Lichtsysteme (Abschnitt 2.3.2) entwerfen zu können. Unter Verwendung der Kriterien erfolgt anschließend eine Bewertung der in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Entwurfsmethoden. Auf Grundlage der Bewertungsergebnisse werden die drei Forschungsfragen abgeleitet.

Analyse bestehender Entwurfsmethoden

Im Stand der Wissenschaft werden die Methoden zum Entwerfen optischer Systeme von KINGSLAKE, MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL., FISCHER, GROSS und VELZEL vorgestellt. Dabei wird gezeigt, dass die Methoden bei der Beschreibung der Herangehensweise, der Anzahl an Entwurfsschritten und in den Entwurfsschritten selbst fundamentale Unterschiede aufweisen. Um die Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme analysieren zu können, werden im Folgenden Kriterien aufgestellt und anschließend zur Bewertung angewandt.

Bevor mit dem Entwurf eines hochauflösenden Lichtsystems begonnen werden sollte, sind zunächst Anforderungen an das System zu definieren. Weiterhin ist zu klären welche Elemente in dem Lichtsystem zur Erfüllung bestimmter Funktionen beispielsweise zur Lichtmodulation oder Strahlformung eingesetzt werden sollen. Dabei können verschiedene Lösungsprinzipie zur Erfüllung einzelner Funktionen möglich sein. So ist die Lichtmodulation beispielsweise reflektiv (DMD) oder transmittiv (LCD) zu lösen. Durch die Verknüpfung der einzelnen Funktionen ist, unter Berücksichtigung der verschiedenen Lösungsprinzipie, eine Vielzahl von Konzepten für das zu entwerfende System möglich. Auf Basis einer vergleichenden Beurteilung der verschiedenen Konzepte ist für den Entwurf ein geeignetes **Konzept als Entwurfsgrundlage** auszuwählen.

Auch mit einem vielversprechenden Konzept als Entwurfsgrundlage ist im Rahmen des Entwurfsprozesses nicht zwangsweise von dem Erhalt einer optimalen Lösung für das hochauflösende Lichtsystem auszugehen. In Abhängigkeit festgelegter Randbedingungen und Entwurfsziele besteht die Möglichkeit einen Entwurf zu erzeugen, welcher den Anforderungen nicht gerecht wird. Für den Erhalt einer zufriedenstellenden Lösung sind daher unter Umständen mehrmalige Optimierungen des Entwurfs erforderlich. Es muss somit die Möglichkeit vorgesehen werden über **Schleifen im Entwurfsprozess** zu spezifischen Entwurfsschritten zurückzukehren, um Anpassungen vornehmen zu können.

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, werden zum Entwerfen optischer Systeme unterschiedliche Arten der Strahlverfolgung eingesetzt. Abbildende optische Systeme werden primär unter Verwendung der sequentiellen Strahlverfolgung entworfen, welche eine schnelle Optimierung und die Bewertung der Abbildungsqualität des Entwurfs ermöglicht. Der Entwurf von Beleuchtungsoptiken hingegen erfolgt primär mithilfe der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung, da unter anderem auftretende Streu- und Reflexionsstrahlung sowie Absorptionsverluste im Entwurf berücksichtigt werden können. Der Einfluss von Streu- und Reflexionsstrahlung ist jedoch auch bei abbildenden optischen Systemen relevant. Umgekehrt wird die schnelle Optimierung der sequentiellen Strahlverfolgung ebenfalls für den Entwurf von Beleuchtungsoptiken eingesetzt. Da in einem hochauflösenden Lichtsystem sowohl Beleuchtungsoptiken als auch Abbildungsoptiken verwendet werden, sind **beide Strahlverfolgungsarten im Entwurfsprozess** zu berücksichtigen.

Sowohl in der Abbildungsoptik als auch der Beleuchtungsoptik lässt sich der optische Wirkungsgrad als eine kritische Auslegungsgröße anführen [HELD20, WOLF17a]. Werden im Rahmen des Entwurfsprozesses die lichttechnischen Anforderungen nicht erfüllt, so wird in den meisten Fällen durch Optimierungen eine Steigerung des optischen Wirkungsgrads angestrebt. Daher ist im Rahmen des Entwurfsprozesses neben Kriterien zur Bewertung der Abbildungsqualität auch der **Wirkungsgrad zur Bewertung von Optikentwürfen** zu berücksichtigen.

Auf Grundlage der vier aufgestellten Kriterien werden im Folgenden die Methoden zum Entwerfen optischer Systeme von KINGSLAKE, MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL., FISCHER, GROSS und VELZEL analysiert.

Konzept als Entwurfsgrundlage

KINGSLAKE beschreibt in seiner Methode ein sehr generisches Vorgehen zum Entwerfen optischer Systeme, bei dem keine Anforderungen erhoben werden. Für den Erhalt eines ersten Entwurfs wird auf anfängliche Prinzipien durch eine vorgeschriebene Reihenfolge logischer

Schritte verwiesen. Offen bleibt, um welche Art von Prinzipien und logischen Schritten es sich dabei handelt. Stattdessen erfolgt der Hinweis, dass in den meisten Fällen der erste Entwurf durch eine erfahrene Person mit versierten Kenntnissen im Bereich der Optik oder durch anpassen und variieren zuvor analysierter und kommerziell erhältlicher optischer Systeme/Elemente erfolgt. Das Kriterium ein Konzept als Entwurfsgrundlage zu verwenden wird somit nicht erfüllt.

Gleiches gilt für MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. und FISCHER, da das gleiche Vorgehen wie bei KINGSLAKE vorgeschlagen wird, allerdings auf Grundlage einer vorherigen Anforderungserhebung.

Bei GROSS wird ein erster Optikentwurf durch eine sogenannte grobe Optimierung auf Grundlage zuvor definierter Anforderungen und Spezifikationen sowie durch Festlegen von Randbedingungen und der *Merit Function* erzeugt. Dieses Vorgehen ist nur möglich, wenn bereits eine konkrete Vorstellung des zu entwerfenden Systems existiert. Somit liegt die Vermutung nahe, dass ein Konzept als Entwurfsgrundlage erforderlich ist, jedoch wird nicht erläutert wie dieses Konzept erarbeitet werden kann.

Auch VELZEL lässt erahnen, dass für den Entwurf des optischen Systems zunächst ein Konzept erarbeitet werden muss, da im Rahmen der Spezifikation die Klärung und Präzisierung der Anwendung und der einzusetzenden optischen Elemente für den Entwurf erfolgt. Welche Schritte im Einzelnen zur Erstellung eines Konzepts erforderlich sind, ist dem Vorgehen jedoch nicht zu entnehmen. Da sowohl bei GROSS als auch bei VELZEL nur vermutet werden kann, dass ein Konzept als Entwurfsgrundlage verwendet wird, ist bei beiden das Kriterium nur teilweise erfüllt.

Schleifen im Entwurfsprozess

KINGSLAKE berücksichtigt in seiner Methode eine Schleife, um durch Maßnahmen wie kleinen Änderungen der Linsenparameter eine Optimierung durchführen zu können. Dies mag für einfache optische System funktionieren, ist jedoch bei komplizierteren optischen Systemen kein geeignetes Vorgehen für eine zielgerichtete Optimierung. Die Möglichkeit, über eine Schleife zum ersten Entwurfsschritt zurückzukehren, ist nicht vorgesehen. Wird somit zu Beginn des Entwurfsprozesses eine unzureichende Entwurfsgrundlage nach dem Vorgehen von KINGSLAKE gewählt, so ist ein endloser Durchlauf der Optimierungsschleife wahrscheinlich, da keine geeignete Entwurfslösung erzeugt wird. Dennoch wird das Kriterium Schleifen im Entwurfsprozess vorzusehen erfüllt.

FISCHER und GROSS sehen in ihren Methoden vergleichbare Schleifen vor, um den Optikentwurf bei Nichterfüllung der Anforderungen optimieren zu können. Für die anfängliche Opti-

mierung wird empfohlen über eine Schleife zunächst Variablen und Restriktionen anzupassen und die *Merit Function* im Hinblick auf die Entwurfsziele zu überprüfen. Wird trotz mehrmaligem Durchlauf dieser Schleife keine ausreichende Optimierung erreicht, sind über eine zweite Schleife die optischen Elemente und Materialien des Entwurfs zu modifizieren. Führt keine der Maßnahmen dazu, dass die Anforderungen an den Entwurf erfüllt werden, ist über eine dritte Schleife zum zweiten Entwurfsschritt der Methode zurückzukehren. In diesem Schritt wird ein neuer erster Entwurf generiert. Bei FISCHER erfolgt dies erneut auf Grundlage kommerziell erhältlicher optischer Systeme/Elemente, welches im ungünstigsten Fall wie bei KINGSLAKE zu einem endlosen Durchlauf der Optimierungsschleifen führt. Da GROSS wie oben beschrieben für den Erhalt eines ersten Optikentwurfs keine konkreten Ansätze liefert, ist unklar wie ein neuer erster Entwurf erzeugt werden soll. Da in beiden Methoden Schleifen zur Optimierung vorgesehen werden, wird das Kriterium erfüllt.

Die Methoden von MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. und VELZEL erfüllen das Kriterium nicht, da nicht die Möglichkeit vorgehalten wird über Schleifen zu spezifischen Entwurfsschritten zurückzukehren.

Sequentielle und nicht-sequentielle Strahlverfolgung im Entwurfsprozess

KINGSLAKE, MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL., FISCHER, GROSS und VELZEL gehen in ihren Methoden nur indirekt oder gar nicht auf die sequentielle und nicht-sequentielle Strahlverfolgung zum Entwerfen optischer Systeme ein. So erwähnen MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL., dass potentielle Schwächen des Optikentwurfs, welche aufgrund vereinfachter Annahmen im Rahmen der sequentiellen Strahlverfolgung auftreten können, durch eine optionale Streulichtanalyse zu identifizieren sind. Da Streu- und Reflexionsstrahlung bei einer nicht-sequentiellen Strahlverfolgung berücksichtigt werden, ist davon auszugehen dass beide Strahlverfolgungsarten in die Methode von MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. einbezogen werden. KINGSLAKE verweist in seiner Methode zwar darauf, dass für die Leistungsbewertung des Entwurfs unterschiedliche Arten der Strahlverfolgung eingesetzt werden, spricht jedoch keine Empfehlung aus, wann welche Art der Strahlverfolgung verwendet werden sollte. Daher wird das Kriterium für beide Methoden als teilweise erfüllt gewertet.

Auch bei GROSS wird im letzten Entwurfsschritt auf die Analyse von Streulicht im Entwurf eingegangen, wobei der Fokus auf die Ursachen von Streulicht gerichtet ist und weniger auf die Möglichkeiten dieses zu identifizieren. Das Kriterium die Strahlverfolgungsarten zu berücksichtigen wird somit nicht erfüllt.

Der strukturelle Aufbau der Methode von FISCHER lässt vermuten, dass ein ausschließlich sequentieller Entwurf des optischen Systems erfolgt, allerdings wird von FISCHER auf keine

der beiden Strahlverfolgungsarten eingegangen. Auch VELZEL erwähnt die beiden Strahlverfolgungsarten nicht, sodass beide Methoden das Kriterium nicht erfüllen.

Wirkungsgrad zur Bewertung des Optikentwurfs

Für die Bewertung von Optikentwürfen werden in den Methoden von KINGSLAKE, FISCHER und VELZEL Abbildungsfehler, die MTF oder PSF als Kriterien aufgeführt. In der Methode von MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. erfolgt im Anschluss an die Optimierung des Optikentwurfs (keine Schleife) eine Toleranzanalyse in der Einflussfaktoren wie Fertigungsrestriktionen und Ausrichtungsfehler der optischen und mechanischen Elemente berücksichtigt werden. Eine Bewertung des Optikentwurfs im Hinblick auf die Abbildungsqualität oder den Wirkungsgrad wird nicht erwähnt. Es ist somit davon auszugehen, dass beides nicht berücksichtigt wird. Bei GROSS werden zu Bewertung des Entwurfs keine expliziten Kriterien genannt. Somit wird das Kriterium von keiner der Methoden erfüllt.

Die Ergebnisse der vergleichenden Bewertung unter Verwendung der aufgestellten Kriterien sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass keine der Methoden zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme geeignet ist.

Tabelle 3.1: Bewertung der verschiedenen Entwurfsmethoden auf Grundlage der aufgestellten Kriterien [erfüllt (+), teilweise erfüllt (o), nicht erfüllt (-)]

	KINGSLAKE [KING10]	MALACARA [MALA18]	FISCHER [FISC08]	GROSS [GROS07]	VELZEL [VELZ14]
Bewertungskriterium					
Konzept als Entwurfsgrundlage	-	-	-	o	o
Schleifen im Entwurfsprozess	+	-	+	+	-
Beide Arten der Strahlverfolgung	o	o	-	-	-
Wirkungsgrad zur Bewertung	-	-	-	-	-

Eine wesentliche Schwäche aller Methoden ist die fehlende Beschreibung zur Herangehensweise wie ein Konzept als Entwurfsgrundlage erarbeitet werden kann. In Bezug auf hochauflösende Lichtsysteme wird somit die folgende Forschungsfrage abgeleitet.

1. Welche Schritte sind beim Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme zu berücksichtigen und wie können diese in geeigneter Weise methodisch beschrieben werden?

Für das Vorgehen zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme lässt sich darüber hinaus auf Grundlage der vergleichenden Methodenbewertung die zweite Forschungsfrage ableiten.

2. Wie kann der Entwurfsprozess hochauflösender Lichtsysteme unter Berücksichtigung der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung methodisch beschrieben werden?

Basierend auf den ersten beiden Forschungsfragen und den in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten DMD-basierter Scheinwerfer wird die dritte Forschungsfrage formuliert.

3. Wie sind die Methoden zum Konzipieren und Entwerfen am Beispiel eines DMD-Scheinwerfers anzuwenden?

4 Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme

In diesem Kapitel werden in Bezug auf die formulierten Forschungsfragen Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme hergeleitet. Angefangen mit der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme werden in Abschnitt 4.1 die einzelnen Konzipierungsschritte vorgestellt und im Hinblick auf die Herangehensweise und die Ergebnisse erläutert. In Abschnitt 4.2 wird nach dem gleichen Vorgehen die Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme hergeleitet.

4.1 Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme

Im Hinblick auf die erste Forschungsfrage dieser Arbeit werden im Folgenden zunächst die einzelnen Schritte zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme hergeleitet und durch deren Verknüpfung die in Abbildung 4.1 dargestellte Methode ausgearbeitet. Anschließend werden die einzelnen Konzipierungsschritte in Bezug auf die Herangehensweise und Ergebnisse erläutert. Infolge der Verknüpfung und Beschreibung der einzelnen Konzipierungsschritte wird ein planmäßiges und zielorientiertes Vorgehen zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme bereitgestellt.

Wie bei den meisten in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Methoden sind zunächst Anforderungen an das hochauflösende Lichtsysteme zu definieren und in einer Anforderungsliste festzuhalten. Als zentrales und étenduelimitierendes Element eines hochauflösenden Lichtsystems ist im nächsten Schritt der einzusetzende Lichtmodulator im Hinblick auf die Technologie, Anzahl und Größe festzulegen. Anschließend ist auf Grundlage der Étendue des Lichtmodulators die Lichterzeugung zu spezifizieren. Dabei werden neben der Technologie auch die Größe und Anzahl der Lichtquellen zur Beleuchtung des Lichtmodulators ermittelt. Abgesehen von dem Lichtmodulator und der Lichterzeugung ist für die Umsetzung des hochauflösenden Lichtsystems die Architektur, welche durch die optischen Elemente zur Strahlformung und -ablenkung

sowie deren räumliche Anordnung innerhalb des Systems beschrieben wird, festzulegen. In Abhängigkeit der Systemarchitektur sowie des Einsatzbereichs sind für die Beleuchtung des Lichtmodulators verschiedene Strategien geeignet, von denen eine in dem nachfolgenden Konzipierungsschritt definiert werden muss. Anschließend ist eine auf die Beleuchtungsstrategie abgestimmte Verzeichnung zur Projektion in den Anwendungsbereich festzulegen.

Da bei jedem Konzipierungsschritt verschiedene Lösungsprinzipien zur Umsetzung möglich sind und dadurch auch Konzepte ausgearbeitet werden können die den lichttechnischen Anforderungen nicht gerecht werden, ist eine Absicherung des ausgearbeiteten Konzepts erforderlich. Hierfür wird ein sogenannter Étenduefaktor zur Bewertung der Effizienz und Lichtstromfaktor zur Bewertung der Umsetzbarkeit lichttechnischer Anforderungen ermittelt. Werden die Faktoren gemäß ihrer Definition erfüllt, kann mit dem letzten Konzipierungsschritt der Methode fortgefahren werden. Dabei wird ein Strahlenmodell des konzipierten Lichtsystems als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf erstellt. Werden die Faktoren nicht gemäß ihrer Definition erfüllt, so ist über Schleifen zu spezifischen Konzipierungsschritten zurückzukehren.

Angefangen mit dem Konzipierungsschritt „Anforderungen definieren“ werden nachfolgend die einzelnen Schritte der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme im Hinblick auf die Herangehensweise erläutert.

Anforderungen definieren

Angefangen mit der Definition von Anforderungen werden in diesem Schritt Fest-, Wunsch- und Zielanforderungen zur Umsetzung des hochauflösenden Lichtsystems definiert und in einer Anforderungsliste festgehalten. Dabei können abgesehen von lichttechnischen Anforderungen beispielsweise auch Anforderungen im Hinblick auf die einzusetzende Technologie oder Systemarchitektur definiert werden.

Lichttechnische Anforderungen können zum Beispiel zu realisierende Lichtfunktionen (Abblendlicht, Fernlicht, Informationsprojektion usw.), photometrische Größen (Lichtstrom, Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte usw.) sowie geometrische Größen des optischen Systems (Länge des optischen Systems, Anzahl der optischen Elemente, Linsendurchmesser usw.) sein. Anforderungen hinsichtlich der einzusetzenden Technologie lassen sich unter anderem aus der Lichtmodulation (LCD, LCoS, DMD, usw.) oder Lichterzeugung (Gasentladung, Laserdiode, LED, usw.) ableiten. Anforderungen in Bezug auf die Systemarchitektur des hochauflösenden Lichtsystems werden im Wesentlichen durch die Anordnung der optischen Elemente zur Strahlformung und -ablenkung sowie der einzusetzenden Technologien zur Lichterzeugung und -modulation definiert.

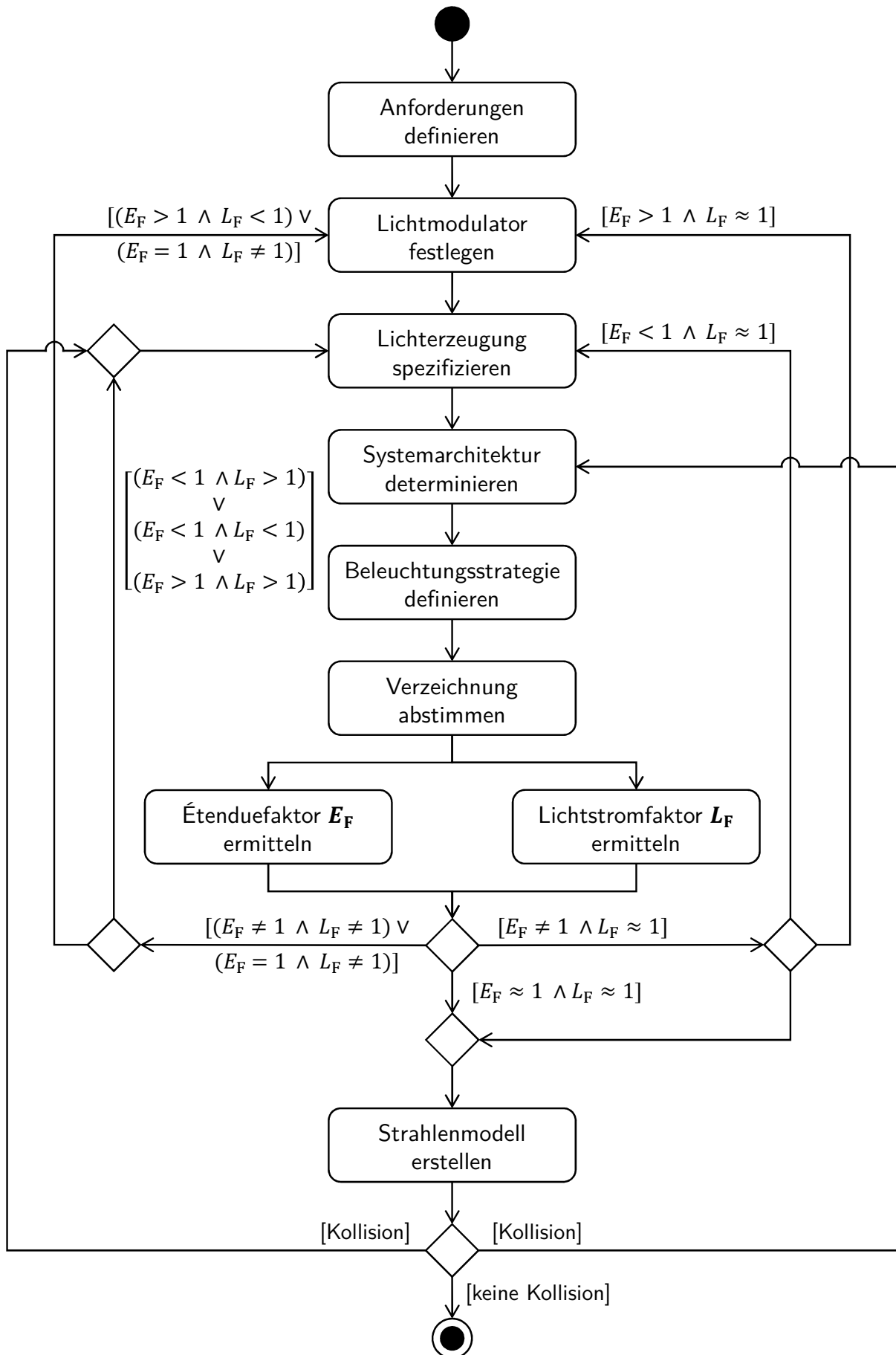


Abbildung 4.1: Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme nach [LEY19b]

Lichtmodulator festlegen

Als étenduelimitierende und elementare Komponente zur Umsetzung der lichttechnischen Anforderungen in einem hochauflösenden Lichtsystem ist zunächst die Festlegung des Lichtmodulators erforderlich. Sofern im Rahmen der Anforderungserhebung keine bestimmte Technologie zur Lichtmodulation (LCD, LCoS, DMD, usw.) definiert wird, erfolgt dies in diesem Konzipierungsschritt. Weiterhin ist in Abhängigkeit der Anwendung das Seitenverhältnis der aktiven Modulatorfläche sowie die Anzahl einzusetzender Lichtmodulatoren zu klären. Die erforderliche Größe der aktiven Modulatorfläche lässt sich auf Grundlage der Étendue des Lichtmodulators, dem geforderten Lichtstrom in der Lichtverteilung und anfänglichen Annahmen wie dem Wirkungsgrad optischer Elemente zur Strahlformung und -ablenkung ermitteln. Je kleiner die aktive Fläche ist, desto weniger Licht kann moduliert werden. Da sich im Rahmen der Konzipierungsphase Änderungen ergeben können, ist die Étendue des Lichtmodulators kontinuierlich zu prüfen.

Lichterzeugung spezifizieren

Nach der Festlegung des einzusetzenden Lichtmodulators im Hinblick auf die Technologie, Seitenverhältnis, Anzahl und Größe ist die Lichterzeugung zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche zu spezifizieren. In diesem Konzipierungsschritt wird zunächst die einzusetzende Technologie (Temperaturstrahler, Entladungslampe, Elektrolumineszenzstrahler, usw.) ausgewählt, sofern dies noch nicht im Rahmen der Anforderungserhebung erfolgt ist. Weiterhin werden die Anzahl der Lichtquellen und die Größe der Emissionsfläche bestimmt. Die erforderliche Anzahl einzusetzender Lichtquellen wird unter Berücksichtigung der Étendue des Lichtmodulators ermittelt. Auf Grundlage eines Étenduevergleichs zwischen Lichtquelle und Lichtmodulator kann, unter der Annahme eines idealen optischen Systems zur Beleuchtung, bei vergleichbaren Étenduewerten von einem effizienten Lichtsystem ausgegangen werden.

Systemarchitektur determinieren

Bei der Determinierung der Systemarchitektur werden sowohl die optischen Elemente zur Strahlformung und -ablenkung als auch deren räumliche Anordnung zur Umsetzung des optischen Systems festgelegt. Unter Berücksichtigung der Anforderungen sowie der gewählten Technologie zur Lichtmodulation und -erzeugung resultieren dabei unterschiedliche Möglichkeiten für die räumliche Anordnung. Unter Verwendung eines Lichtmodulators lässt sich das optische System in ein Beleuchtungssystem – zur Beleuchtung des Lichtmodulators – und ein Projektionssystem – zur Projektion in den Anwendungsbereich – unterteilen. Beide optischen Subsysteme werden zur Erfüllung unterschiedlicher Funktionen eingesetzt und sind dennoch sowohl funktional als auch räumlich direkt

voneinander abhängig. Die funktionale Abhängigkeit resultiert aus der Strategie zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche und der Ausleuchtung des Anwendungsbereichs. Die räumliche Abhängigkeit wird von der gewählten Technologie zur Lichtmodulation bedingt und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Étendue des Systems.

Beleuchtungsstrategie definieren

Mit Kenntnis der Technologie zur Lichtmodulation und -erzeugung sowie der Systemarchitektur und der einzusetzenden optischen Elemente wird die Strategie zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche definiert. Dabei lassen sich die Beleuchtungsstrategien primär in abbildend und nichtabbildend und sekundär in homogen und inhomogen differenzieren [LEY18b]. Durch abbildende Beleuchtungsstrategien kann bei entsprechenden Fertigungs- und Montagetoleranzen der optischen und mechanischen Elemente eine präzise Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche erreicht werden. Lichtstromverluste infolge einer Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche, wie sie bei einer nichtabbildenden homogenen oder inhomogenen Beleuchtungsstrategie resultieren [BHAK15, GUT14], werden dadurch reduziert. Allerdings kann, mit einer an die inhomogene Beleuchtung angepassten Verzeichnung des optischen Systems zur Projektion in den Anwendungsbereich, die Gesamteffizienz des hochauflösenden Lichtsystems gesteigert werden [KNÖC18].

Verzeichnung abstimmen

Im Hinblick auf die funktionale Abhängigkeit des Beleuchtungs- und Projektionssystems wird in diesem Konzipierungsschritt die Verzeichnung des Projektionssystems auf die zuvor definierte Beleuchtungsstrategie abgestimmt. Als Abbildungsfehler optischer Systeme wird von der Verzeichnung keine Unschärfe sondern eine Verzerrung des projizierten Bildes hervorgerufen, welches zu einem ortsvarianten Abbildungsmaßstab führt [PEDR05, HERI17b]. Ziel des Konzipierungsschrittes ist eine den lichttechnischen Anforderungen entsprechende lokale Veränderung des Abbildungsmaßstabes zu erreichen, um eine für die Anwendung angepasste Lichtverteilung zu generieren. KNÖCHELMANN ET AL. [KNÖC18] und HELD [HELD20] stellen unter anderem einen anamorphotischen Ansatz zur Variation des Abbildungsmaßstabes in horizontaler oder vertikaler Richtung vor. Ein veränderlicher Abbildungsmaßstab in radialer Richtung, wie er von WOLF ET AL. [WOLF16, WOLF17b] beschrieben wird, ermöglicht die Umverteilung der Beleuchtungsstärke zur Bildmitte bei gleichzeitig variabler Pixelgröße.

Um das erarbeitete Konzept des hochauflösenden Lichtsystems in Bezug auf die Étendueerhaltung und damit die Effizienz zu überprüfen, erfolgt im nächsten Schritt die Ermittlung eines sogenannten Étenduefaktors.

Étenduefaktor E_F ermitteln

Der Étenduefaktor E_F ist definiert als Verhältnis der Étendue der Lichtquelle G_{LQ} zur Étendue des Lichtmodulators G_{LM} und wird zur Bewertung der Effizienz des konzipierten Lichtsystems verwendet [HELD18a]. Ein Systemkonzept mit hoher Effizienz ist durch einen Étenduefaktor von ungefähr eins ($E_F \approx 1$) gekennzeichnet. Ist der Étenduefaktor deutlich größer ($E_F > 1$) oder kleiner ($E_F < 1$) als eins zeichnet sich das Systemkonzept durch Ineffizienz aus.

Ein ineffizientes Systemkonzept ist jedoch nicht gleichbedeutend mit der Nichterfüllung lichttechnischer Anforderungen. Umgekehrt ist mit einem effizienten Systemkonzept nicht zwangsweise die Erfüllung lichttechnischer Anforderungen gesichert. Aus diesem Grund wird nachfolgend der Lichtstromfaktor des Systemkonzepts ermittelt.

Lichtstromfaktor L_F ermitteln

Der Lichtstromfaktor L_F ist als das Verhältnis von Ist- zu Soll-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche definiert und wird zur Konzeptabsicherung im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der lichttechnischen Anforderungen genutzt. Der Soll-Lichtstrom wird auf Grundlage des geforderten Lichtstroms in der Lichtverteilung und Annahmen wie dem Wirkungsgrad des optischen Systems zur Projektion in den Verkehrsraum und der Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche ermittelt. Basierend auf der Étendue der Lichtquelle und dem damit nutzbaren Lichtstromanteil zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche wird der Ist-Lichtstrom unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Beleuchtungssystems ermittelt.

Ähnlich wie beim Étenduefaktor können drei Fälle eintreten. Durch einen Lichtstromfaktor von ungefähr und größer eins ($L_F \approx 1$, $L_F > 1$) werden Systemkonzepte ausgewiesen mit denen die lichttechnischen Anforderungen realisiert werden können. Systemkonzepte mit einem Lichtstromfaktor deutlich kleiner als eins ($L_F < 1$) werden den lichttechnischen Anforderungen nicht gerecht.

Basierend auf den unterschiedlichen Fallkombinationen von Étenduefaktor und Lichtstromfaktor wird im Folgenden durch eine Fallunterscheidung das erarbeitete Systemkonzept hinsichtlich Étendueerhaltung und lichttechnischer Anforderungserfüllung bewertet.

Fallunterscheidung

Im Allgemeinen können die eintretenden Fälle in drei Kategorien eingeteilt werden. Kategorie 1 $[(E_F \neq 1 \wedge L_F \neq 1) \vee (E_F = 1 \wedge L_F \neq 1)]$ definiert Fälle, in denen die lichttechnischen Anforderungen aufgrund eines zu geringen Lichtstromfaktors nicht umgesetzt werden können. Für diese Fälle werden in der Methode Schleifen vorgehalten über die entweder zum Konzipierungsschritt „Lichterzeugung spezifizieren“ oder „Licht-

modulator festlegen" zurückzukehren ist. Ist der Einsatz einer Lichtquelle mit höherem Lichtstrom und gleicher Étendue möglich, ist zum Schritt „Lichterzeugung spezifizieren" zurückzukehren. Andernfalls ist der Einsatz eines Lichtmodulators mit einer größeren aktiven Fläche erforderlich.

Kategorie 2 [$E_F \neq 1 \wedge L_F \approx 1$] charakterisiert Fälle, bei denen die lichttechnischen Anforderungen zwar erfüllt werden, das Systemkonzept jedoch aufgrund eines Étenduefaktors deutlich ungleich eins durch Ineffizienz gekennzeichnet ist. Für diese Fälle werden in der Methode zwei Lösungsvarianten bereitgestellt. Bei Variante 1 ist über Schleifen zu den Konzipierungsschritten „Lichterzeugung spezifizieren" oder „Lichtmodulator festlegen" zurückzukehren, um wie oben beschrieben Anpassungen vornehmen zu können und in zweiter oder mehrfacher Iteration dennoch ein étendueerhaltendes Systemkonzept zu generieren. Wird der Systemeffizienz eine untergeordnete Rolle zuteil, kann durch Variante 2 mit dem Konzipierungsprozess fortgefahren werden.

Kategorie 3 [$E_F \approx 1 \wedge L_F \approx 1$] ist der Idealfall. Systemkonzepte die dieser Kategorie zugeordnet werden, sind durch Étendueerhaltung bei gleichzeitiger Erfüllung der lichttechnischen Anforderungen gekennzeichnet, sodass ohne zusätzliche Anpassungen mit dem letzten Konzipierungsschritt der Methode fortgefahren werden kann.

Strahlenmodell erstellen

Als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf des hochauflösenden Lichtsystems wird im letzten Schritt der Methode zum Konzipieren ein Strahlenmodell erstellt. Dabei wird der Strahlengang von der objektseitigen Lichtquelle bis zum bildseitigen Projektionsbereich mithilfe der paraxialen Optik beschrieben. Gleichzeitig können auf Basis des Strahlenmodells kritische Systemkonfigurationen wie die Kollision einzelner optischer Elemente miteinander bzw. des Beleuchtungs- und Projektionssystems identifiziert werden. Für den Fall, dass Kollisionen identifiziert werden, ist über Schleifen innerhalb der Methode zu den Konzipierungsschritten „Systemarchitektur determinieren" oder „Lichterzeugung spezifizieren" zurückzukehren. Da die räumliche Anordnung der optischen Elemente zur Strahlformung und -ablenkung durch die Systemarchitektur festgelegt wird, sind zunächst im Konzipierungsschritt „Systemarchitektur determinieren" Maßnahmen zur Aufhebung der Kollision durchzuführen. Ist eine Änderung der Systemarchitektur nicht möglich oder auf Grund von Anforderungen unerwünscht, kann die Kollision gegebenenfalls auch durch die Auswahl einer kleineren Lichtquelle aufgelöst werden. In beiden Fällen jedoch ist eine erneute Überprüfung des Étendue- und Lichtstromfaktors sowie die Erstellung eines Strahlenmodells erforderlich.

4.2 Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme

Unter Berücksichtigung der Kriterien aus Kapitel 3 wird im Folgenden eine Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme vorgestellt. Die Methode ist dabei in einen sequentiellen und nicht-sequentiellen Entwurf gegliedert (Abbildung 4.2). Als Entwurfsgrundlage wird das erarbeitete Konzept bzw. Strahlenmodell des zuvor konzipierten Lichtsystems verwendet.

Im Hinblick auf die vereinfachte Modellierung und schnelle Optimierung bei der sequentiellen Strahlverfolgung, erfolgt zunächst der Aufbau eines sequentiellen Entwurfs des hochauflösenden Lichtsystems. Hierfür wird im ersten Schritt die Emissionscharakteristik und -fläche der spezifizierten Lichtquelle definiert. Anschließend werden auf Basis des Strahlenmodells die Funktionsflächen der einzusetzenden optischen Elemente festgelegt und die Parameter der Funktionsflächen, welche im Rahmen der Optimierung verändert werden dürfen, bestimmt. Gleichzeitig werden Randbedingungen festgelegt, welche sich beispielsweise aus den anfänglich definierten Anforderungen ergeben. Im nächsten Entwurfsschritt erfolgt die Erstellung einer *Merit Function*, in der die einzuhaltenden und zu erreichenden Entwurfsziele festgehalten werden. Im Optimierungsschritt werden die Optimierungsart und -zyklen sowie der Optimierungsalgorithmus festgelegt und die Optimierung durchgeführt. Für abbildende optische Systeme erfolgt anschließend eine Bewertung der Abbildungsqualität. Fertigungs- und ausrichtungsbedingte Einflüsse auf die Abbildungsqualität können durch das Zuweisen von Toleranzen berücksichtigt werden. Wird die Abbildungsqualität nicht erfüllt, sind über eine Schleife Anpassungen der Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen durchzuführen. Für Beleuchtungsoptiken kann der Entwurfsschritt zur Bewertung der Abbildungsqualität übersprungen und mit dem Aufbau des nicht-sequentiellen Entwurfs fortgeföhren werden.

Im ersten Schritt des nicht-sequentiellen Entwurfs wird zunächst die vereinfachte Lichtquelle des sequentiellen Entwurfs durch eine parametrische Modellierung mit entsprechender Winkel- und Ortsauflösung oder unter Verwendung einer Strahldatei ersetzt. Anschließend werden den einzelnen optischen Elementen des Lichtsystems Material-, Beschichtungs- und Streuungsdefinitionen zu gewiesen. Unter Berücksichtigung auftretender Streu- und Reflexionsstrahlung sowie Absorptionsverlusten wird mithilfe einer Strahlverfolgung der Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs ermittelt und bewertet. In Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses sind Streulichtquellen im Entwurf zu identifizieren und ggf. Maßnahmen durchzuführen diese zu verringern. Wird der Wirkungsgrad den Anforderungen nicht gerecht, so ist über eine Schleife zum sequentiellen Entwurf zurückzukehren, um durch Anpassungen der Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen sowie der *Merit Function* eine Optimierung durchzuführen.

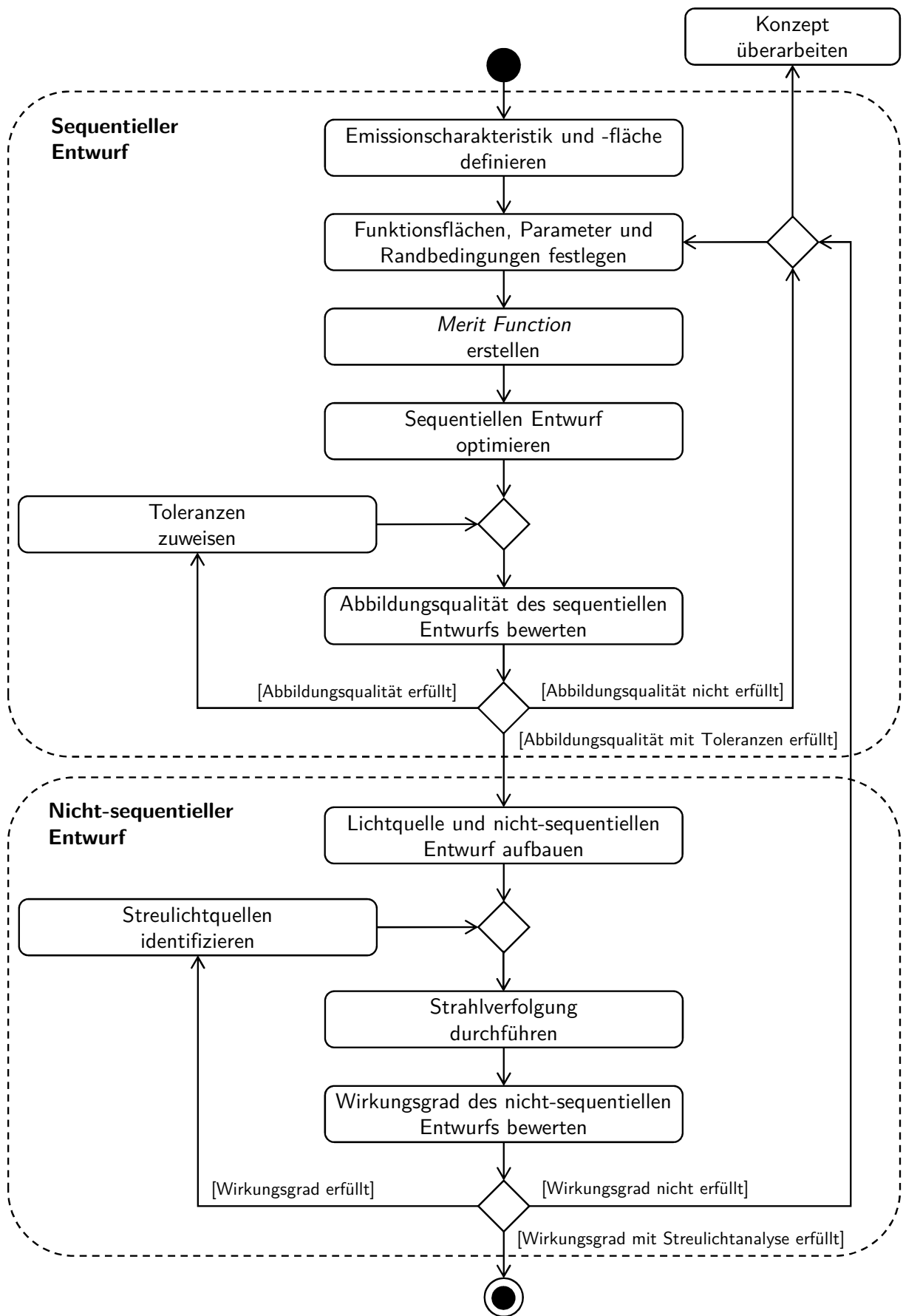


Abbildung 4.2: Methode zum Entwerfen optischer Systeme

Können die Anforderungen an den Wirkungsgrad trotz mehrmaligem Durchlauf dieser Schleife nicht erfüllt werden, ist über eine zweite Schleife das Konzept des hochauflösenden Lichtsystems mithilfe der Methode zum Konzipieren zu überarbeiten.

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme im Hinblick auf die Herangehensweise erläutert. Dabei wird mit dem sequentiellen Entwurf angefangen.

Emissionscharakteristik und -fläche definieren

Mit der Definition der Emissionscharakteristik und -fläche der Lichtquelle werden in diesem Schritt die räumliche Ausbreitung der von der Lichtquelle emittierten Strahlen sowie deren Wellenlänge(n) und die Größe der Emissionsfläche festgelegt. Durch die Anordnung sogenannter *Fields*, von denen die räumliche Ausbreitung der Strahlen erfolgt, wird die Größe der Emissionsfläche definiert. Um eine hohe Strahlformungsqualität der nachfolgenden Funktionsflächen zu erreichen, ist es vorteilhaft mehrere *Fields* zur Beschreibung der Emissionsfläche anzuordnen. Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Wellenlängen, um chromatische Aberrationen zu reduzieren. Strahlen die zur Formung durch die nachfolgenden Funktionsflächen berücksichtigt werden sollen, lassen sich unter anderem über die Eintrittspupille oder numerische Apertur der Funktionsfläche sowie dem Emissionswinkel der *Fields* festlegen.

Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen

Auf Grundlage der in dem Strahlenmodell festgehaltenen optischen Elemente zur Strahlformung und -ablenkung werden in diesem Schritt zunächst die Funktionsflächen für den sequentiellen Entwurf festgelegt. In dem Optiks simulationsprogramm Zemax OpticStudio[®] werden refraktive optische Elemente zur Strahlformung und -ablenkung wie Linsen oder Prismen durch die Kombination von zwei bzw. drei Funktionsflächen definiert. Dabei wird sowohl die Dicke als auch das Material über die erste Funktionsfläche festgelegt. Reflektive optische Elemente zur Strahlformung oder -ablenkung wie Reflektoren oder Planspiegel werden durch eine einzelne Funktionsfläche, unter Angabe der reflektierenden Eigenschaft als Material, definiert.

Sind alle Funktionsflächen für den sequentiellen Entwurf festgelegt, erfolgt die Identifikation und Bestimmung von Funktionsflächenparametern wie Radien, Materialien oder Abstände, die im Rahmen der Optimierung verändert bzw. nicht verändert werden dürfen. In der frühen Phase des sequentiellen Entwurfs erweist sich eine limitierte Anzahl veränderlicher Parameter, insbesondere bei den Materialeigenschaften, zum Erhalt einer ersten Näherung als vorteilhaft. Mit zunehmender Gestalt des Entwurfs kann im

Rahmen von Optimierungsschleifen die Anzahl veränderlicher Funktionsflächenparameter gesteigert werden. Grundsätzlich ist darauf zu achten die Parameter auf sinnvolle Werte zu restriktieren, beispielsweise im Hinblick auf die Fertigbarkeit. Weiterhin lässt sich in Abhängigkeit von Erfahrungswerten sowie des optischen Elements, welches durch die Funktionsfläche(n) beschrieben wird, die Form der Funktionsfläche(n) definieren. Für Linsen können beispielsweise Funktionsflächen mit sphärischer oder asphärischer Form festgelegt werden.

Abschließend werden Randbedingungen definiert, die sich insbesondere aus den erhobenen Anforderungen zu Beginn der Konzipierungsphase ergeben. Dies können unter anderem konstruktive Randbedingungen wie ein fester Abstand zwischen Emissionfläche und erster Funktionsfläche sein.

Merit Function erstellen

Für die Optimierung des sequentiellen Entwurfs ist zunächst eine sogenannte *Merit Function* zu erstellen. Als Ausdruck einzuhaltender und zu erreichender Entwurfsziele kann die *Merit Function* in Abhängigkeit der Komplexität des Entwurfs sowie der zu erfüllenden Anforderungen standard- oder benutzerdefiniert ausgeführt werden. Einzuhaltende Entwurfsziele werden durch Festlegen von Mindest- und/oder Maximalwerten der veränderlichen Parameter beschrieben, wodurch mehrere gültige Entwurfslösungen resultieren können. Als Beispiel einzuhaltender Entwurfsziele kann hier die Länge des Optikentwurfs angeführt werden, welche gemäß den Anforderungen einen bestimmten Wert nicht überschreiten soll. Zu erreichende Entwurfsziele werden durch Festlegen eindeutiger Werte der veränderlichen Parameter beschrieben, wodurch nur eine gültige Entwurfslösung resultiert. Exemplarisch für die zu erreichenden Entwurfsziele wird an dieser Stelle die Festlegung definierter horizontaler und vertikaler Winkelbereiche, die entsprechend den Anforderungen ausgeleuchtet werden sollen, aufgeführt.

An diesen Beispielen zeigt sich, dass je mehr Anforderungen an den sequentiellen Entwurf gestellt werden, desto mehr Freiheiten sind in der *Merit Function* für die Optimierung gefordert. Diese Freiheiten werden letztendlich nur durch Festlegen einer entsprechenden Anzahl veränderlicher Parameter zugelassen.

Sequentiellen Entwurf optimieren

Bevor die eigentliche Optimierung des sequentiellen Entwurfs erfolgt, sind zunächst die Optimierungsart, der Optimierungsalgorithmus sowie die Anzahl an Optimierungszyklen festzulegen. Wie bereits MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. [MALA18] erläutern, kann die Art der Optimierung "lokal" oder "global" erfolgen. Aufgrund der stochastischen Optimierung eignet sich die "globale" Optimierung insbesondere in der frühen Phase des

Entwurfsprozesses, um zunächst eine erste Näherung des Entwurfs zu generieren. Mit zunehmender Gestalt des sequentiellen Entwurfs ist eine "lokale" Optimierung sinnvoll, da hierdurch schnell effektive Verbesserungen erzielt werden können. Entspricht ein durch die "lokale" Optimierung generierter Entwurf nicht den Anforderungen kann durch eine erneute "globale" Optimierung eine umfassende Verbesserung des bestehenden Entwurfs erreicht werden.

In Abhängigkeit der gewählten Optimierungsart sowie des Anwendungsbereichs für den Entwurf (Abbildungsoptik oder Beleuchtungsoptik) besteht die Möglichkeit verschiedene Optimierungsalgorithmen zu verwenden. Grundsätzlich eignen sich Algorithmen die nach der Methode *Damped Least Squares* funktionieren, da diese speziell für den Entwurf optischer Systeme entwickelt wurde [MEIR65].

Abschließend erfolgt die Definition einer geeigneten Anzahl an Optimierungszyklen. Auch hier gilt, ähnlich wie bei der Festlegung variabler Parameter, dass in der frühen Phase des Entwurfsprozesses eine limitierte Anzahl sinnvoll ist. Nach dem Erhalt einer ersten Näherung für den sequentiellen Entwurf kann die Anzahl an Optimierungszyklen erhöht werden.

Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs bewerten

Mit dem Ziel, ein abbildendes optisches System zu entwerfen, wird im Anschluss an den Optimierungsschritt die Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs bewertet. Für den Fall, dass eine Beleuchtungsoptik entworfen wird, kann dieser Entwurfsschritt übersprungen werden. Für die Bewertung der Abbildungsqualität von Optikentwürfen sind unterschiedliche Kriterien entwickelt worden [WILL17]. Zu den gängigsten Kriterien zählen die MTF, die PSF, die *Encircled Energy* (EE), der RMS-Punktradius sowie Abbildungsfehler [SMIT00, KING10, FISC08].

Die Auswahl bzw. Eignung eines Kriteriums zur Bewertung der Abbildungsqualität ist im Wesentlichen von dem späteren Anwendungsgebiet des optischen Systems abhängig. So erfolgt beispielsweise die Bewertung der Abbildungsqualität von Objektiven im Bereich der Photographie unter Verwendung der MTF als Kriterium [CONS71, KOND75]. Bei der Bewertung der Abbildungsqualität von Optikentwürfen für LiDAR Systeme eignet sich hingegen das Kriterium der EE [NOVA19]. Darüber hinaus gibt es einige Bewertungskriterien wie Abbildungsfehler die keine direkten Rückschlüsse auf die Abbildungsqualität des Optikentwurfs ermöglichen und nur unter Zuhilfenahme anderer Kriterien (z.B. MTF) eine Aussage über die Abbildungsqualität erlauben [WILL17].

Eine Möglichkeit, die Abbildungsqualität von Optikentwürfen unter Berücksichtigung simultan auftretender optischer Effekte (Beugung, Aberration, Verzeichnung, usw.) visuell

darzustellen, sind Bildsimulationen. Darüber hinaus können mit Bildsimulationen auch die Bildorientierung und relative Beleuchtung überprüft werden [SASI19].

Wird die Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs nicht erfüllt, ist über eine Schleife innerhalb der Methode zum Schritt "Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen" zurückzukehren, um Anpassungen vornehmen zu können. Unter Umständen sind für die Erfüllung der Abbildungsqualität weitere Funktionsflächen oder Randbedingungen festzulegen und zusätzliche Funktionsflächenparameter zu variabilisieren. Weiterhin sind die einzuhaltenden und zu erreichenden Entwurfsziele in der *Merit Function* zu prüfen und anschließend eine erneute Optimierung des sequentiellen Entwurfs durchzuführen. Werden die Anforderungen an die Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs trotz mehrmaligem Durchlauf dieser Schleife nicht erfüllt, ist in die Konzipierungsphase zurückzukehren und das Konzept zu überarbeiten.

Toleranzen zuweisen

Um den Einfluss fertigungs- und ausrichtungsbedingter Abweichungen auf die Abbildungsqualität des sequentiellen Optikentwurfs überprüfen zu können, ist es sinnvoll den einzelnen Funktionsflächen Toleranzen zuzuweisen und erneut die Abbildungsqualität zu bewerten. Für die Überprüfung fertigungsbedingter Einflüsse ist eine dem Fertigungsverfahren (Ultrapräzisionsdrehen, CNC-Bearbeitung, etc.) entsprechende Tolerierung des sequentiellen Entwurfs durchzuführen. Die Tolerierung der einzelnen Funktionsflächen erfolgt dabei hinsichtlich ihrer Oberfläche und Lage. Als Lagetoleranzen sind hier die Dezentrierung und Verkippung der Funktionsflächen zur optischen Achse zu nennen. Oberflächentoleranzen werden beispielsweise durch Abweichungen des Linsenradius und der Linsendicke repräsentiert. Ausrichtungsbedingte Abweichungen der Funktionsflächen ergeben sich aus Positionierungsgenauigkeiten im gefertigten optischen System und können ebenfalls über die Dezentrierung und Verkippung berücksichtigt werden. In Abhängigkeit der Anwendung und geforderten Genauigkeit ist zusätzlich die Untersuchung von Materialabweichungen, wie veränderlicher refraktiver und dispersiver Eigenschaften der verwendeten optischen Materialien, sinnvoll.

Entspricht die Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs unter Berücksichtigung der zugewiesenen Toleranzen nicht den Anforderungen, ist erneut zum Schritt "Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen" zurückzukehren. Bei Anforderungserfüllung wird der Entwurfsprozess durch den Aufbau des nicht-sequentiellen Entwurfs fortgesetzt.

Lichtquelle und nicht-sequentiellen Entwurf aufbauen

Für den nicht-sequentiellen Entwurf wird zunächst die anfänglich definierte Emissionscharakteristik und -fläche der Lichtquelle (sequentieller Entwurf) durch eine realitätsnahe Lichtquelle ersetzt, um die Lichtstärkeverteilung während der späteren Strahlverfolgung berücksichtigen zu können. Dies kann entweder durch eine parametrische Modellierung der Lichtquelle mit entsprechender Winkel- und Ortsauflösung der Lichtstärke gemäß dem Datenblatt oder durch die Verwendung einer Strahldatei erfolgen. Mithilfe der Strahldatei, welche in der Regel mehrere Millionen Strahlen enthält, wird die gemessene ortsauflöste Strahldichte der Lichtquelle aus unterschiedlichen Winkelpositionen beschrieben. Jedem einzelnen Strahl ist dabei ein definierter Startpunkt, Richtung und Teillichtstrom zugewiesen [ROTS16]. Unabhängig vom gewählten Ansatz zur Modellierung der Lichtquelle muss die notwendige Anzahl an Strahlen für die nachfolgende Strahlverfolgung festgelegt werden. Grundsätzlich ist eine hohe Anzahl an Strahlen für die Strahlverfolgung sinnvoll, um präzise Aussagen im Hinblick auf den Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs machen zu können. Abgesehen von der Strahlenanzahl erfolgt zusätzlich die Spezifikation des Quellenlichtstroms sowie der emittierten Wellenlänge(n).

Für den vollständigen Aufbau des nicht-sequentiellen Entwurfs ist abgesehen von der Lichtquelle ebenfalls der Lichtmodulator des hochauflösenden Lichtsystems zu modellieren. Je detaillierter der nicht-sequentielle Entwurf ausgeführt wird, desto präzisere Aussagen können bei der Wirkungsgradbewertung gemacht werden. Daher müssen den optischen Volumenelementen (Linsen, Prismen, etc.), welche aus den optimierten Funktionsflächen des sequentiellen Entwurfs generiert werden, Material-, Beschichtungs- und Streuungsdefinitionen zugewiesen werden. Die räumliche Anordnung aller Elemente erfolgt dabei auf Grundlage des sequentiellen Entwurfs.

Strahlverfolgung durchführen

Als Grundlage für die nachfolgende Wirkungsgradbewertung des nicht-sequentiellen Entwurfs wird eine Strahlverfolgung durchgeführt. Dabei wird, unter Berücksichtigung der winkel- und ortsauflösten Lichtstärke der Lichtquelle, eine definierte Anzahl an Strahlen durch das optische System verfolgt. In Abhängigkeit der zugewiesenen Material-, Beschichtungs- und Streuungsdefinitionen sowie der einzelnen optischen Elemente unterliegen die einzelnen Strahlen dabei Refraktion, Diffraktion, (Total-)Reflexion, Streuung, Teilung oder Absorption beziehungsweise einer Kombination dieser optischen Effekte. Die Strahlverfolgung erfolgt dabei solange, bis eines der drei Abbruchkriterien aus Abschnitt 2.2.1 erfüllt wird.

Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs bewerten

Im Anschluss an die Strahlverfolgung wird der nicht-sequentielle Entwurf hinsichtlich des Wirkungsgrads bewertet. Dabei ist es sinnvoll, abgesehen von dem Gesamtwirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs, auch die Wirkungsgrade der einzelnen optischen Elemente zu ermitteln. Werden die lichttechnischen Anforderungen nur vereinzelt nicht erreicht, kann über eine Schleife zum Entwurfsschritt „Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen“ zurückgekehrt werden. Mit Kenntnis der Wirkungsgrade der einzelnen optischen Elemente können im Rahmen des sequentiellen Entwurfs gezielt Maßnahmen an einzelnen optischen Elementen zur Verbesserung durchgeführt werden. Gegebenenfalls ist diese Schleife mehrfach zu durchlaufen, bis die lichttechnischen Anforderungen erfüllt werden.

Lässt sich trotz mehrmaligem Durchlauf dieser Schleife erkennen, dass die Anforderungen nicht erfüllt werden können, ist über eine zweite Schleife aus der Entwurfsphase in die Konzipierungsphase zurückzukehren und das Konzept des hochauflösenden Lichtsystems zu überarbeiten.

Wird im Rahmen der Wirkungsgradbewertung unerwünschte Streu- und Reflexionsstrahlung im nicht-sequentiellen Entwurf festgestellt, welche negative Auswirkungen auf die lichttechnischen Anforderungen haben, ist unter Umständen eine Streulichtanalyse durchzuführen.

Streulichtquellen identifizieren

Die Streulichtanalyse ist einen wichtiger Schritt zur Validierung des nicht-sequentiellen Entwurfs. Im Rahmen der Streulichtanalyse werden alle Quellen analysiert, die eine unerwünschte Reduktion des Kontrasts oder der Abbildungsqualität hervorrufen. Bei einer vollumfänglichen Streulichtanalyse werden neben den Streu- und Reflexionseigenschaften des optischen Entwurfs auch die Streu- und Reflexionseigenschaften des mechanischen Entwurfs (z.B. Linsenhalterungen) berücksichtigt. BREault beschreibt im *Handbook of Optics* [BASS95] verschiedene Ansätze um Streustrahlung in optischen Systemen zu reduzieren.

Effektive Ansätze zur Identifikation kritischer Oberflächen im Strahlengang sind die objekt- und bildseitige Betrachtung des optomechanischen Entwurfs. Dabei werden basierend auf den Daten der zuvor durchgeführten Strahlverfolgung ausgewählte Strahlen hinsichtlich deren Interaktion mit Oberflächen analysiert, um spezifisches Streulicht zu identifizieren. Mit der Identifikation kritischer Oberflächen können unterschiedliche Maßnahmen, wie die Applikation von Antireflexbeschichtungen oder die konstruktive Neugestaltung einzelner Elemente, zur Reduktion der Streustrahlung vorgenommen werden. In

den meisten Fällen jedoch führt laut BREault die Positionierung einer Aperturblende an einer geeigneten Stelle im Strahlengang zu einer weitaus höheren Verbesserung des Streuverhaltens, als es durch eine Beschichtung oder konstruktive Neugestaltung erwirkt werden kann.

Die Wirksamkeit durchgeführter Maßnahmen zur Reduktion auftretender Streustrahlung beim optomechanischen Entwurf ist, infolge einer erneuten Strahlverfolgung mit anschließender Bewertung des Wirkungsgrades, zu prüfen. Werden die Anforderungen an den Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs unter Berücksichtigung von Streu- und Reflexionsstrahlung erfüllt, endet die Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme.

5 Konzipieren eines DMD-Scheinwerfers

In diesem Kapitel wird mithilfe der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme ein hochauflösender Scheinwerfer unter Verwendung der DMD-Technologie zur Lichtmodulation und LED-Technologie zur Lichterzeugung konzipiert. Das Kapitel ist dabei entsprechend der Konzipierungsschritte gegliedert.

In Abschnitt 5.1 werden zunächst Anforderungen an den DMD-Scheinwerfer erarbeitet und in einer Anforderungsliste festgehalten. Anschließend werden in Abschnitt 5.2 verschiedene Konzepte zur Lichtmodulation unter Verwendung der DMD-Technologie vorgestellt und diskutiert. Die Auswahl eines geeigneten Konzepts und DMDs zur Realisierung des Scheinwerfers erfolgt abschließend auf Grundlage von Bewertungskriterien.

Für die LED-basierte Lichterzeugung werden in Abschnitt 5.3 Konzepte auf Basis der additiven Farbmischung und Lumineszenzkonversion zur Umsetzung einer hochlumigen Weißlichtquelle veranschaulicht. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Konzepte werden unter Verwendung verschiedener Kriterien bewertet und ein geeignetes Konzept ausgewählt.

Auf Grundlage der beschriebenen Strahlengängen in optischen Systemen (Abschnitt 2.1.6) werden in Abschnitt 5.4 Architekturkonzepte zur Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers mit telezentrischem und nicht-telezentrischem Strahlengang erarbeitet. Unter Berücksichtigung des gewählten Konzepts zur Lichtmodulation und -erzeugung erfolgt eine Bewertung der verschiedenen Architekturkonzepte sowie die Auswahl eines geeigneten Architekturkonzepts.

In Abschnitt 5.5 werden Strategien zur abbildenden und nichtabbildenden Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche vorgestellt. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Strategie werden unter Berücksichtigung des determinierten Architekturkonzepts diskutiert und mithilfe von Bewertungskriterien eine Auswahl getroffen.

Für die Abbildung des DMDs in den Verkehrsraum wird in Abschnitt 5.6 auf Basis der gewählten Beleuchtungsstrategie die Verzeichnung für das Projektionssystem abgestimmt.

Im letzten Abschnitt des Kapitels werden zur Konzeptabsicherung der Lichtstrom- und Étenduefaktor des konzipierten DMD-Scheinwerfers ermittelt und ein Strahlenmodell als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf erstellt.

5.1 Anforderungen definieren

Mit dem Ziel einen DMD-Scheinwerfer zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen zu konzipieren und entwerfen, werden in diesem Abschnitt lichttechnische, technologische, thermische und elektrische Anforderungen sowie Anforderungen an das optische System des DMD-Scheinwerfers definiert und in einer Anforderungsliste (Tabelle 5.1) festgehalten.

Lichttechnische Anforderungen

Das auszuleuchtende FOV wird gemäß der ECE-Regelung 8 [ECE8] zu $\pm 20^\circ$ horizontal und $+5^\circ$ bis -10° vertikal festgelegt. KNÖCHELMANN [KNÖC21] definiert für ein vergleichbares FOV eine Lichtstrom von 1.400 lm zur Erzeugung einer Fernlichtverteilung, welcher in dieser Arbeit übernommen wird. Die Beleuchtungsstärke im Punkt HV wird in der ECE-Regelung 123 [ECE123] mit einem Maximalwert von 344 lx spezifiziert. GÜNTHER [GÜNT10] kommt nach der Vermessung unterschiedlicher Scheinwerfersysteme zu dem Schluss, dass eine Beleuchtungsstärke von 100 - 150 lx in HV ausreichend ist. HELD [HELD20] definiert in seiner Arbeit einen Wert von 120 lx für die Beleuchtungsstärke in HV, an dem sich in dieser Arbeit orientiert wird. Die maximal zulässige Beleuchtungsstärke im Punkt B50L wird entsprechend der ECE-Regelung 123 [ECE123] zu 0,5 lx festgelegt. Der Farbort der Abblend- und Fernlichtverteilung sowie der Symbolprojektion wird entsprechend der ECE-Regelung 48 [ECE48] zu „weiß“ definiert.

Hinsichtlich der Größe und Position projizierter Symbole haben sowohl LEE ET AL. [LEE11] als auch KNÖCHELMANN [KNÖC21] Untersuchungen durchgeführt. LEE ET AL. kommen zu dem Schluss, dass eine Projektion in einer Entfernung von 12,63 m vor dem Fahrzeug mit einer Breite von 1,5 m von den Probanden bevorzugt wird. In Abhängigkeit der Anbauhöhe des Scheinwerfers (Mittelklasse 0,6 m bzw. SUV 0,9 m) entspricht dies einem vertikalen Winkel von $-2,7^\circ$ bzw. -4° unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze. Der horizontale Winkel ergibt sich entsprechend der Symbolbreite zu $\pm 3,4^\circ$. KNÖCHELMANN definiert einen größeren Projektionsbereich von 0° bis $-9,1^\circ$ vertikal und $\pm 11,9^\circ$ horizontal, welcher in dieser Arbeit übernommen wird.

Zur Bewertung der Effizienz des zu konzipierenden und entwerfenden DMD-Scheinwerfers werden die Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilung herangezogen. Dabei wird sich an den Werten aus der Arbeit von KAUSCHKE [KAUS06] orientiert, mit dem Ziel diese zu erhöhen. Als einziges System mit einem ähnlich großen FOV werden die Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilung mit 8,2 % bzw. 12,6 % angegeben. Bei den anderen Systemen sind entweder keine Werte angegeben oder es handelt sich um Systeme die nicht zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen geeignet sind.

Technologische Anforderungen

Für die Modulation des Lichts wird die DMD-Technologie verwendet, da diese eine sehr hohe Variabilität der Lichtverteilung ermöglicht und einen geringen Bauraum des Gesamtsystems erfordert [KAUS06]. Ein weiterer Vorteil gegenüber anderen Technologien wie Flüssigkristallen ist, dass unpolarisiertes Licht moduliert werden kann. Dieser Aspekt wirkt sich positiv bei der Umsetzung des optischen Systems zur Beleuchtung des Lichtmodulators aus, da weniger optische Elemente eingesetzt werden können.

Für die Lichterzeugung sollen LEDs eingesetzt werden, da diese durch eine hohe Lebensdauer, Lichtausbeute und geringe Leistungsaufnahme gekennzeichnet sind.

Thermische Anforderungen

Bei der Verwendung von LEDs zur Lichterzeugung ist die betriebsbedingte Erwärmung, welche zu einer Reduktion der Lichtausbeute und Lebensdauer führt, zu berücksichtigen. Die temperaturbedingte Reduktion der Lichtausbeute wird insbesondere bei roten LEDs, wie der Osram LE A P2W, welche vorwiegend AlGaInP-basiert sind, ersichtlich. Ein Anstieg der Sperrschichttemperatur von 25 °C auf 90 °C führt bei der Osram LE A P2W zu einer Reduktion des emittierten Lichtstroms um circa. 45 %, welches nahezu einer Halbierung der Lichtausbeute entspricht. Bei einer Sperrschichttemperatur von 70 °C werden die Lichtstromverluste auf circa 17 % verringert [OSRA19a]. InGaN-basierte LEDs, zu denen zumeist grüne und blau LEDs wie die LE CG P2W bzw. die LE B P2W gehören, sind durch eine geringere Temperaturanfälligkeit gekennzeichnet. Eine Sperrschichttemperatur von 70 °C führt bei der LE CG P2W zu einer Reduktion des emittierten Lichtstroms um lediglich 2 % und bei der LE B P2W um 4 % [OSRA19b, OSRA20e].

Bei leuchtstoffbasierten LEDs wie der Osram Boost HL werden bei einer Sperrschichttemperatur von 70 °C Lichtstromverluste in Höhe von 7,6 % verzeichnet [OSRA20d]. Da bei einer Sperrschichttemperatur von 70 °C vertretbare Verluste auftreten, wird diese Temperatur zum Konzipieren und Entwerfen des DMD-Scheinwerfers als Grundlage verwendet. Diese kann durch eine aktive Kühlung der LED erreicht werden.

Elektrische Anforderungen

Im Hinblick auf den Einsatz in einem Fahrzeug wird bei der Auswahl geeigneter LEDs zur Umsetzung der Lichtquelle die typische Bordnetzspannung eines PKWs von 14 V berücksichtigt [REIF10, HEUC13]. Da das Bordnetz vom Fahrzeug in Abhängigkeit des Fahrzyklus Schwankungen unterliegt [REIF11], wird als Toleranz $\pm 1V$ berücksichtigt. Die LEDs sind dabei ohne Pulsweitenmodulation (PWM) mit Konstantstrom (CC) zu betreiben.


Anforderungen optisches System

Unter Verwendung von LEDs zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DMDs hat sich der Einsatz eines Dreilinsensystems als zweckdienlich erwiesen [BHAK15, UHLE19]. Daher wird in dieser Arbeit ebenfalls ein Dreilinsensystem sowohl zur Beleuchtung des DMDs als auch zur Projektion in den Verkehrsraum angestrebt. Weiterhin wird auf die Verwendung eines homogenisierenden Elements (Fly's Eye Linse oder Interator Rod) im Beleuchtungssystem verzichtet, da dieses zu einer Vergrößerung der Étendue führt und somit die Systemeffizienz reduziert wird.

Aus fertigungstechnischen Gründen werden rotationssymmetrische Linsen bevorzugt. Darüber hinaus wird für eine kompakte Bauweise des Systems ein Abstand von 1 mm zwischen der Emissionsfläche der LEDs und der ersten Linsenfläche festgelegt. Für den Entwurf eines kompakten Lichtsystems wird der Abstand zwischen den LEDs und dem DMD auf maximal 100 mm begrenzt. Darüber hinaus soll ein Linsendurchmesser von 70 mm nach Möglichkeit nicht überschritten werden.

Für den Entwurf des optischen Systems wird PMMA als Linsenmaterial festgelegt und eine Antireflexbeschichtung der Linsen berücksichtigt.

Tabelle 5.1: Anforderungsliste (Auszug)

		Hochauflösendes Lichtsystem		F=Festforderung Z=Zielforderung W=Wunschforderung	
Nr.	Anforderungen	Art	Wert/Bereich	Toleranz	Einheit
1 Lichttechnische Anforderungen					
1.1	Horizontales FOV	F	±20	-	°
1.2	Vertikales FOV	F	+5 bis -10	-	°
1.3	Lichtstrom	Z	1.400	min	lm
1.4	E_{Max} in HV	Z	120	min	lx
1.5	E_{Max} in B50L	Z	0,5	max	lx
1.6	Farbort nach ECE48	F	„weiß“	-	K
1.7	Horizontaler Projektionsbereich	F	±11,9	-	°
1.8	Vertikaler Projektionsbereich	F	-9,1 bis 0	-	°
1.9	Wirkungsgrad Abblendlichtverteilung	Z	8,2	min	%
1.10	Wirkungsgrad Fernlichtverteilung	Z	12,6	min	%
2 Technologische Anforderungen					
2.1	Technologie zur Lichterzeugung	F	LED	-	-
2.2	Technologie zur Lichtmodulation	F	DMD	-	-
3 Thermische Anforderungen					
3.1	Aktive Kühlung der LEDs	F	Ja	-	-
3.2	Sperrschichttemperatur der LEDs	Z	70	max	°C
4 Elektrische Anforderungen					
4.1	Energieversorgung wie Bordnetz	Z	14	±1	V
4.2	Betriebsart der LEDs	F	CC	-	-
4.3	PWM-Betrieb der LEDs	F	Nein	-	-
5 Anforderungen optisches System					
5.1	Anzahl Linsen Beleuchtungssystem	Z	3	max	-
5.2	Anzahl Linsen Projektionssystem	Z	3	max	-
5.3	Abstand zwischen LEDs und DMD	Z	100	max	mm
5.4	Abstand Emissionsfläche zu Linse	F	1	-	mm
5.5	Durchmesser größte Linse	Z	70	max	mm
5.6	Rotationssymmetrische Linsen	W	Ja	-	-
5.7	Einsatz eines Homogenisators	F	Nein	-	-
5.8	Linsenmaterial	F	PMMA	-	-
5.9	Linsenbeschichtung	W	Antireflex	-	-

5.2 Lichtmodulator festlegen

Entsprechend der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme wird im Folgenden die Anzahl einzusetzender Lichtmodulatoren festgelegt. Für die Lichtmodulation unter Verwendung der DMD-Technologie kann dabei grundsätzlich zwischen Multichip-Konzepten, bei denen zwei oder sogar drei DMD-Chips zur Lichtmodulation eingesetzt, und dem Einzelchip-Konzept unterschieden werden [FLOR96, HORN99]. Beginnend mit Multichip-Konzepten wird im Folgenden auf die Möglichkeiten zur technischen Umsetzungen sowie deren Vor- und Nachteile eingegangen. Anschließend werden im Rahmen des Einzelchip-Konzepts Bewertungskriterien erarbeitet, die als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Konzepts zur Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers dienen. Im letzten Abschnitt erfolgt auf Basis der Étendue die Auswahl eines geeigneten DMDs, um den in den Anforderungen definierten Lichtstrom von 1.400 lm in einem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ modulieren zu können.

5.2.1 Multichip-Konzepte zur Lichtmodulation

Die technische Umsetzung von Multichip-Konzepten zur Lichtmodulation kann mithilfe dichroitischer Prismen realisiert werden. Dabei werden die dichroitischen Prismen zur selektiven Reflexion und Transmission definierter Wellenlängen unter Verwendung unterschiedlicher Beschichtungen eingesetzt. Die Applikation dichroitischer Beschichtungen zur Strahlteilung bedingt die Umsetzung einer Systemarchitektur mit telezentrischem Strahlengang (vgl. Abschnitt 2.1.6) [LAIK07]. Um dies zu erreichen eignet sich wie in Abbildung 5.1 dargestellt der Einsatz eines TIR-Prismas zwischen dem einfallenden polychromatischen Licht und den dichroitischen Prismen. Die Anzahl einzusetzender dichroitischer Prismen kann dabei in Abhängigkeit der angestrebten spektralen Aufteilung des Lichts variieren. Bei einem Zwei-Chip-DMD-Konzept (Abbildung 5.1 (a)) werden zwei und bei einem Drei-Chip-DMD-Konzept (Abbildung 5.1 (b)) drei miteinander verkittete dichroitische Prismen eingesetzt. Letzteres wird auch als trichroitische Prismenanordnung bezeichnet [KWOK00]. Die Geometrie der einzelnen Prismen ist dabei von dem umzulenkenden Spektralanteil des Lichts abhängig, mit dem Ziel identische optische Weglängen für alle Spektralanteile zu erreichen [SCHM13].

Ausgehend von einer Lichtquelle, von der polychromatisches Licht emittiert wird, werden sowohl bei dem Zwei-Chip-DMD-Konzept als auch bei dem Drei-Chip-DMD-Konzept die Lichtstrahlen zunächst mittels strahlformenden optischen Elementen auf das TIR-Prisma gelenkt. Infolge der auftretenden Totalreflexion werden die Lichtstrahlen in das erste dichroitische Prisma reflektiert. An der Grenzfläche der beiden verkitteten Prismen wird bei dem Zwei-Chip-

DMD-Konzept der Rotanteil (R) reflektiert und anschließend auf einen DMD totalreflektiert. Der verbleibende Grünblauanteil (G,B) transmittiert die dichroitischen Schichten der Prismengrenzflächen und trifft nach Durchquerung des zweiten Prismas auf ein weiteres DMD. Die im *On-State* befindlichen Mikrospiegel der beiden DMDs reflektieren die jeweiligen Spektralanteile, welche anschließend an den Grenzflächen der beiden dichroitischen Prismen totalreflektiert und rekombiniert werden.

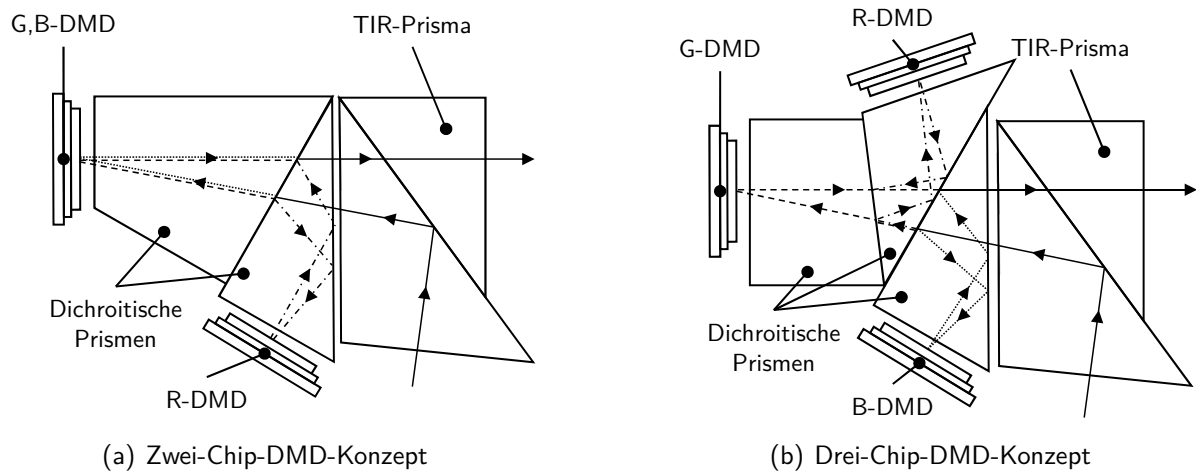


Abbildung 5.1: Technische Umsetzung von Multi-Chip-Konzepten zur Lichtmodulation nach [HORN99]

Bei dem Konzept unter Verwendung von drei DMD-Chips, welches auch im Patent von VANDORPE ET AL. [VAND06] beschrieben wird, erfolgt unter Zuhilfenahme eines weiteren dichroitischen Prismas zusätzlich die Separation des Grünlicht- und Blaulichtanteils. Die beiden Spektralanteile werden anschließend jeweils auf einen separaten DMD reflektiert. Nach der Rückreflexion durch die im *On-State* befindlichen Mikrospiegel erfolgt auch hier die Rekombination der Spektralanteile (vgl. Abbildung 5.1 (b)).

Multichip-Konzepte sind besonders für licht- und farbstarke Anwendungen geeignet, da Systeme mit hohem Lichtdurchsatz und hoher Leuchtdichte umgesetzt werden können [CHEN16, FLOR96]. Darüber hinaus kann mit zunehmender Anzahl eingesetzter DMDs die optische Effizienz des Systems gesteigert werden [HORN96]. Bedingt durch den Einsatz einer dichroitischen bzw. trichroitischen Prismenanordnung führen Multichip-Konzepte bei der technischen Umsetzung jedoch zu komplexen optischen Systemen. Einhergehend mit der Komplexität der optischen Systeme zur Aufteilung der Spektralanteile resultiert ein zunehmender Justageaufwand für die einzelnen DMD-Chips um eine exakte Bildüberlagerung zu erreichen. Weiterhin erfordert die Zusammenführung der einzelnen Spektralbilder bei Multichip-Konzepten, verglichen mit einem Einzel-Chip-Konzept, ein größeres optisches System zur Projektion [McDo01].

5.2.2 Einzelchip-Konzept zur Lichtmodulation

Bei einem Einzelchip-Konzept zur Lichtmodulation wird entgegen den Multichip-Konzepten lediglich ein einzelner DMD-Chip eingesetzt. Wird zur Beleuchtung des DMDs eine Weißlichtquelle verwendet, erfolgt die Aufteilung der Primärfarben Rot, Grün und Blau sequentiell mittels dichroitischen Filtersegmenten, welche in dem optischen Pfad zur Beleuchtung des DMDs angeordnet sind. Für die Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers mit dem lediglich "weißes" Licht in den Verkehrsraum projiziert werden soll ist die sequentiell Aufteilung der Primärfarben mittels dichroitischen Filtersegmenten nicht erforderlich.

Für die Bewertung der Konzepte werden die in Tabelle 5.2 aufgeführten Bewertungskriterien Étendue, geringe Systemkomplexität und kompakte Anordnung herangezogen. Je größer die Étendue des DMD desto mehr Licht kann moduliert werden. Da sich die Étendue bei den Multichip-Konzepten jedoch nicht verdoppelt bzw. verdreifacht sondern lediglich die Farbanteile aufgeteilt werden, ist unter der Voraussetzung, dass für alle Konzepte ein DMD gleicher Größe eingesetzt wird das Kriterium der Étendue für alle Konzepte gleich zu bewerten (o). Bei der Systemkomplexität ist das Einzelchip-Konzept am besten zu bewerten (+), da keine zusätzlichen dichroitischen Prismen benötigt werden und damit ebenfalls der Justageaufwand geringer ist. Auch für die Realisierung einer möglichst kompakten Anordnung ist das Einzelchip-Konzept am besten zu bewerten.

Tabelle 5.2: Bewertung von Konzepten zur Lichtmodulation mittels DMD-Technologie für einen DMD-Scheinwerfer

Lichtmodulation	1-Chip-DMD	2-Chip-DMD	3-Chip-DMD
Bewertungskriterium			
Étendue	o	o	o
Geringe Systemkomplexität	+	o	-
Kompakte Anordnung	+	o	-

Auf Basis der Kriterien zur Bewertung der Multi-Chip- und Einzel-Chip-Konzepte zur Lichtmodulation wird ersichtlich, dass für die Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers das Einzel-Chip-Konzept am besten geeignet ist. Im Folgenden wird für dieses Konzept auf Grundlage der Étendue ein geeigneter DMD ausgewählt.

5.2.3 Auswahl eines DMDs

Das Vorgehen zur Auswahl eines geeigneten DMDs für die Umsetzung eines Scheinwerfers zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen erfolgt am Beispiel der in Tabelle 5.3 aufgeführten

DMDs, von denen lediglich der DLP5531 für den automobilen Einsatz in der Außenbeleuchtung zertifiziert ist. Weiterhin werden für die Auswahl folgende Annahmen getroffen:

- Sowohl für das optische System zur Beleuchtung des DMDs als auch zur Abbildung in den Verkehrsraum werden jeweils drei Linsen eingesetzt.
- Die Linsen haben einen Transmissionsgrad von 96 % und sind mit einer Antireflexbeschichtung versehen.
- Der Brechungsindex der Abschlusscheibe des DMDs ist $n = 1$.
- Der DMD wird unter einem Winkel von 12° beleuchtet.
- Der DMD wird über die aktive Fläche hinaus beleuchtet, sodass der Nutzlichtstrom um 16 % reduziert wird [TEXA19c].
- Es wird der Wirkungsgrad des jeweiligen DMDs berücksichtigt.

Tabelle 5.3: Ausgewählte Spezifikationen des DLP5531 und DLP7000 [TEXA19a, TEXA19c]

	DLP5531	DLP7000
Wellenlängenbereich in nm	420 – 700	400 – 700
Kippwinkel der Mikrospiegel in °	12	
Anordnung der Mikrospiegel	<i>Diamond Pixel Array</i>	<i>Orthogonal Pixel Array</i>
Abstand der Mikrospiegel (P) in µm	7,60	13,68
Auflösung in Pixel	1.152 × 576	1.024 × 768
Seitenverhältnis	2:1	4:3
Wirkungsgrad im Wellenlängenbereich	0,66	0,68

Entsprechend der in Tabelle 5.3 aufgeführten Spezifikationen, den Annahmen sowie den Gleichung 2.23 und 2.24 lässt sich die Étendue des DLP5531 zu

$$G_{\text{DLP5531}} = 9,61 \text{ mm}^2\text{sr} \quad (5.1)$$

bestimmen und die Étendue des DLP7000 zu

$$G_{\text{DLP7000}} = 18,26 \text{ mm}^2\text{sr} . \quad (5.2)$$

Auf Basis des geforderten Lichtstroms von 1.400 lm in einem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ lässt sich, unter Berücksichtigung der Étendue und des Wirkungsgrads des jeweiligen DMDs, dem Wirkungsgrad des optischen Systems zur Projektion in den Verkehrsraum und der Reduktion des

Nutzlichtstroms in Höhe von 16 %, der erforderliche Lichtstrom pro Étendue auf der aktiven Modulatorfläche berechnen. Für den DLP5531 ergibt sich demzufolge ein erforderlicher Lichtstrom pro Étendue von

$$\left(\frac{\Phi}{G}\right)_{\text{DLP5531}} = \frac{1.400 \text{ lm}}{0,885 \cdot 0,66 \cdot 0,84 \cdot 9,61 \text{ mm}^2\text{sr}} = 296,92 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}} \quad (5.3)$$

und für den DLP7000

$$\left(\frac{\Phi}{G}\right)_{\text{DLP7000}} = \frac{1.400 \text{ lm}}{0,885 \cdot 0,68 \cdot 0,84 \cdot 18,26 \text{ mm}^2\text{sr}} = 151,67 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}. \quad (5.4)$$

Der Quotient aus $\left(\frac{\Phi}{G}\right)_{\text{DLP5531}}$ bzw. $\left(\frac{\Phi}{G}\right)_{\text{DLP7000}}$ und dem Wirkungsgrad des optischen Systems zur Beleuchtung ist der für die Lichtquelle (LQ) notwendige Lichtstrom pro Étendue zur Beleuchtung des DLP5531

$$\left(\frac{\Phi_{\text{LQ}}}{G}\right)_{\text{DLP5531}} = \frac{296,92 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}}{0,885} = 335,5 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}} \quad (5.5)$$

beziehungsweise zur Beleuchtung des DLP7000

$$\left(\frac{\Phi_{\text{LQ}}}{G}\right)_{\text{DLP7000}} = \frac{151,67 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}}{0,885} = 171,38 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}. \quad (5.6)$$

Abschließend ist zu klären von welcher Lichtquelle der geforderte Lichtstrom pro Étendue erfüllt wird. Dies erfolgt am Beispiel der in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Oslon® Boost HL LED, da diese durch eine der höchsten spezifischen Lichtausstrahlungen gekennzeichnet ist. Weitere potentielle Lichtquellen und deren Eignung werden in Abschnitt 5.3 analysiert und diskutiert.

Die Étendue der LED lässt sich mithilfe der Gleichung 2.7 ermitteln und der Lichtstrom kann für eine Sperrschichttemperatur von 70 °C (Anforderungsliste) dem Datenblatt mit 877 lm entnommen werden [OSRA20d]. Der Lichtstrom pro Étendue für die Oslon® Boost HL ergibt sich somit zu

$$\left(\frac{\Phi}{G}\right)_{\text{Boost HL}} = 263,13 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}. \quad (5.7)$$

Für den DLP5531 wird von der Oslon® Boost HL LED kein ausreichender Lichtstrom pro Étendue bereitgestellt, um den geforderten Lichtstrom von 1.400 lm in einem FOV von 40° x 15° zu erreichen. Daher wird für die weitere Konzipierung des DMD-Scheinwerfers der DLP7000

gewählt und im folgenden Abschnitt Konzepte zur Lichterzeugung auf Basis der additiven Farbmischung und Lumineszenzkonversion analysiert und diskutiert.

5.3 Lichterzeugung spezifizieren

Die nachfolgende Spezifikation der Lichterzeugung erfolgt unter Berücksichtigung des ausgewählten Lichtmodulators DLP7000. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, werden dabei die einzusetzende Technologie zur Lichterzeugung, die erforderliche Anzahl an Lichtquellen zur Beleuchtung des Lichtmodulators sowie die Größe der Emissionsfläche(n) festgelegt. Die Anzahl an Lichtquellen und die Größe der Emissionsfläche(n) erfolgt im Hinblick auf eine Übereinstimmung mit der Étendue des DLP7000. Da in dieser Arbeit die LED-Technologie zur Lichterzeugung betrachtet wird, werden im Folgenden Konzepte basierend auf den unterschiedlichen Verfahren zur Umsetzung LED-basierter Weißlichtquellen (vgl. Abschnitt 2.1.3) vorgestellt. Ferner werden die Konzepte, unter Berücksichtigung der Étendue sowie den in der Anforderungsliste festgehaltenen Werten für den Lichtstrom (1.400 lm), ECE Farbraum (weiß) und die Sperrschichttemperatur der LED (70 °C), hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert.

5.3.1 Lichterzeugung auf Basis der additiven Farbmischung

Das einfachste und zugleich kompakteste Konzept basierend auf der additiven Farbmischung ist der Einsatz von RGBW-LEDs, wie der Ostar[®] Stage LE RTDUW S2WP [OSRA20f] der Firma Osram oder der XLamp[®] XM-L[®] Color [CREE20] der Firma Cree. Als Lambertstrahler mit einer Emissionsfläche von 8 mm² wird bei der Ostar[®] Stage LED, ausgehend von der höchsten Klasse, unter einem Emissionswinkel von $\pm 90^\circ$ bei einer Sperrschichttemperatur von 25 °C und einem Durchlassstrom von 1.000 mA ein Lichtstrom von 1.250 lm emittiert [OSRA20f]. Unter Berücksichtigung der Sperrschichttemperatur von 70 °C wird der emittierte Lichtstrom um ca. 10 % auf 1.129 lm reduziert.

Die XLamp[®] XM-L[®] Color LED der Firma Cree erreicht bei vergleichbaren Werten der Emissionsfläche und des Durchlassstroms bei einer Sperrschichttemperatur 70 °C lediglich einen Lichtstrom von 466 lm. Aufgrund des zu geringen Lichtstroms beider LEDs, wobei die Ostar[®] Stage LED zu den kommerziell erhältlichen RGBW-LEDs mit der höchsten spezifischen Lichtausstrahlung zählt, wird deutlich, dass basierend auf der additiven Farbmischung unter Verwendung einer einzelnen LED und des DLP7000 die Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers mit einem Lichtstrom von 1.400 lm zum aktuellen Zeitpunkt nicht realisierbar ist.

Ein alternatives Konzept zur Umsetzung einer Weißlichtquelle für einen DMD-Scheinwerfer kann durch die Überlagerung unterschiedlicher Wellenlängen von separaten LEDs (rot, grün und blau), unter Zuhilfenahme dichroitischer optischer Elemente, erreicht werden [LEY17]. Ähnlich der Multichip-Konzepte zur Lichtmodulation sind zur technischen Umsetzung dichroitische Prismen geeignet [LI05, ZHAO07, HUAN14, SUN14], wie das in Abbildung 5.2 (a) dargestellte Kreuzprisma. Darüber hinaus können, wie in Abbildung 5.2 (b) dargestellt, auch dichroitische Spiegel eingesetzt werden [PAN08, SUN11, SUN17, LI18]. Abgesehen von den in Abbildung 5.2 dargestellten Ausführungsformen existieren noch weitere (vgl. Abbildung 5.1).

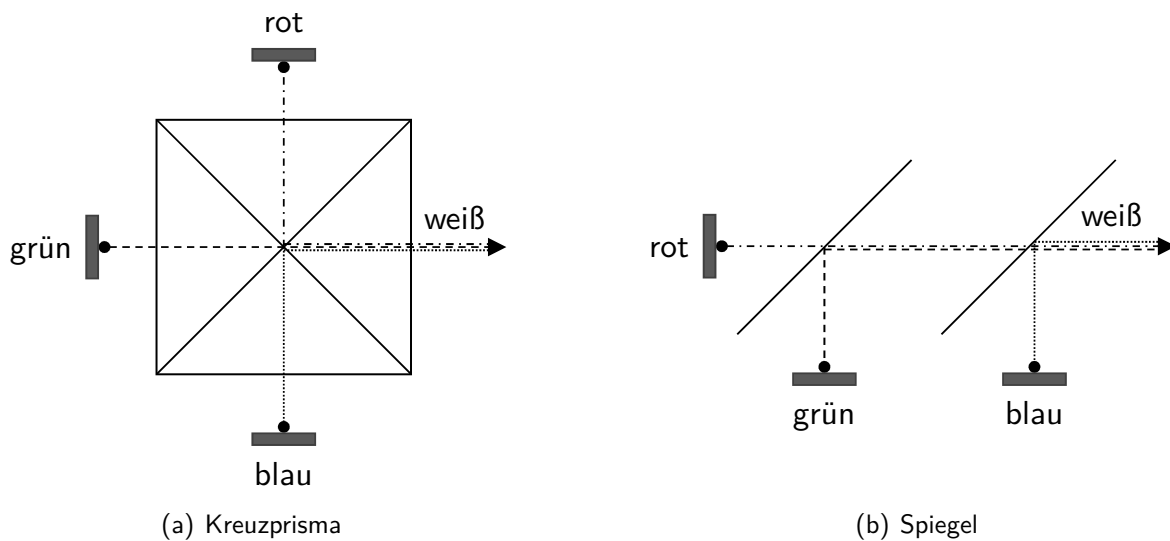


Abbildung 5.2: Konzepte zur Umsetzung hochlumiger Weißlichtquellen auf Basis der additiven Farbmischung unter Verwendung dichroitischer optischer Elemente

Ein wesentlicher Vorteil beim Einsatz separater LEDs zur additiven Farbmischung gegenüber Multichip-LEDs ist die Möglichkeit hochlumige Weißlichtquellen umsetzen zu können. Unter Verwendung des DLP7000 eignen sich dazu insbesondere die in Tabelle 5.4 aufgeführten Ostar[®] Projection Power LEDs der Firma Osram.

Tabelle 5.4: Lichtstrom und Emissionsfläche der Ostar[®] Projection Power LEDs [OSRA19a, OSRA19b, OSRA20e]

	LE A P2W (rot)	LE CG P2A (grün)	LE B P2W (blau)
Lichtstrom in lm bei 25 °C	2.590 – 3.590	5.600 – 10.000	828 – 1.518
Emissionsfläche in mm²	2,6 × 3,2		

Mithilfe von Gleichung 2.7 lässt sich auf Grundlage der Emissionsfläche der LEDs und unter Berücksichtigung der Étendue des DLP7000 ($G_{\text{DLP7000}} = 18,26 \text{ mm}^2\text{sr}$) der maximal nutzbare Emissionswinkel zu

$$\alpha_{mE} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{G_{DLP7000}}{\pi \cdot A_{Pro Power}}} \right) = 56,70^\circ \quad (5.8)$$

bestimmen. Bei vollständiger Einkopplung des unter $\pm 56,70^\circ$ emittierten Lichtstroms in das nachfolgende optische Element zur Strahlformung lässt sich auf Grundlage der Gleichung 2.17 der LED-Wirkungsgrad unter Vernachlässigung von Grenzflächenverlusten am optischen Element zu

$$\eta_{Pro Power} = \sin^2(\alpha_{mE}) = 0,70 \quad (5.9)$$

bestimmen. Unter der Annahme, dass von jeder Ostar[®] Projection Power LED der in Tabelle 5.4 aufgeführte Maximallichtstrom emittiert wird, lassen sich auf Basis des Wirkungsgrades sowie einer Sperrschichttemperatur von 70°C die in Tabelle 5.5 (2. Spalte) zusammengefassten Lichtstromwerte ermitteln.

Tabelle 5.5: Lichtstromwerte der Ostar[®] Projection Power LEDs bei Ausnutzung der Étendue des DLP7000 und zur Erreichung des ECE Farbraums

Lichtstrom in lm		
	bei Ausnutzung der Etendue $G_{LED} = G_{DLP7000}$	zur Erreichung des ECE Farbraums
LE A P2W (rot)	1.733	1.733
LE CG P2A (grün)	6.884	3.250
LE B P2W (blau)	1.020	161
Σ	9.637	5.144

Durch die Überlagerung der einzelnen LED-Lichtstromanteile wird bei vollständiger Ausnutzung der Étendue ein Gesamtlichtstrom von 9.637 lm erreicht. Allerdings wird, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, mit den Farbwertanteilen $C_x = 0,22$ und $C_y = 0,22$ die Forderung einen Farbort innerhalb des ECE Farbraums zu erreichen nicht erfüllt. Um dieser Forderung gerecht zu werden, ist eine Anpassung der jeweiligen Lichtstromanteile erforderlich, welches jedoch zu einer unzureichenden Ausnutzung der Étendue des DLP7000 führt.

Eine mögliche Kombination geeigneter Lichtstromanteile zur Erreichung des ECE Farbraums ist in der dritten Spalte von Tabelle 5.5 aufgeführt. Bei dieser Kombination werden mit $C_x = 0,35$ und $C_y = 0,35$ Farbwertanteile erreicht, welche im geforderten ECE-Farbraum liegen (Abbildung 5.3). Der Gesamtlichtstrom wird dabei jedoch um 46,6 % auf 5.144 lm reduziert. Dies entspricht $281,71 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}$ und erfüllt damit die bei der DMD-Auswahl berechneten $171,38 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}$. Für andere Kombinationen von Lichtstromanteilen werden vergleichbare Werte erreicht.

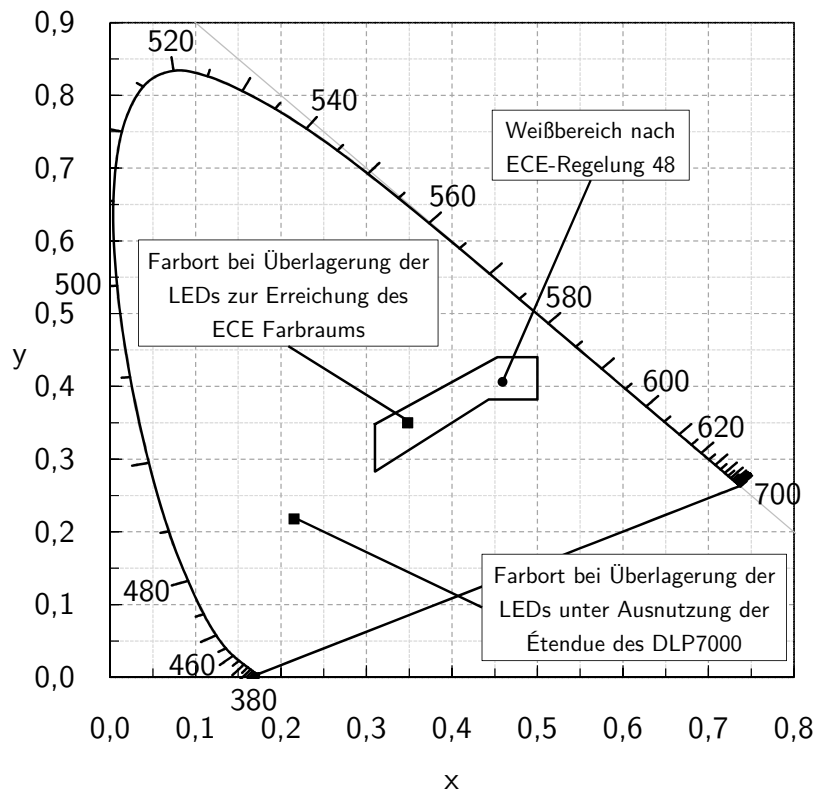


Abbildung 5.3: CIE-Normfarbtabelle mit eingezeichnetem Weißbereich nach ECE-Regelung 48

Wird das gleiche Konzept zur Beleuchtung des DLP5531 genutzt, so sind aufgrund der kleineren Modulatorfläche LEDs mit kleinerer Emissionsfläche einzusetzen. Die Ostar[®] Projection Power LEDs gibt es auch in kleinerer Ausführung mit einer Emissionsfläche von $1,5 \times 2,6 \text{ mm}^2$. Aufgrund der kleineren Emissionsfläche sind die maximalen Lichtströme mit 1.940 lm (rot), 5.600 lm (grün) und 828 lm (blau) geringer. Unter Berücksichtigung der 70 °C Sperrschichttemperatur und der Étendue des DLP5531 ($G_{\text{DLP7000}} = 9,61 \text{ mm}^2\text{sr}$) wird bei gleichen Farbwertanteilen ($C_x = 0,35$ und $C_y = 0,35$) ein Gesamtlichtstrom von 2.423 lm erreicht. Der Lichtstrom pro Étendue ergibt sich somit zu $252,15 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}$ und ist damit geringer als die erforderlichen $335,5 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}$.

5.3.2 Lichterzeugung auf Basis der Lumineszenzkonversion

Eine weitere Möglichkeit zur Umsetzung hochlumiger Weißlichtquellen für die Beleuchtung des DLP7000 ist der Einsatz von „weißen“ LEDs in einem Array. Dieses Konzept wird im Folgenden am Beispiel der in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten und zur DMD-Auswahl verwendeten Osram Oslon[®] Boost HL vorgestellt. Anders als bei den Ostar[®] Projection Power LEDs ist die Emissionsfläche der HL LED, wie in Tabelle 5.6 aufgeführt, deutlich kleiner, sodass un-

ter Berücksichtigung der Étendue mehrere dieser Lichtquellen zur Beleuchtung des DLP7000 eingesetzt werden können.

Tabelle 5.6: Lichtstrom und Emissionsfläche der Oslon® Boost HL LED [OSRA20d]

Boost HL	
Lichtstrom in lm bei 25 °C	669 – 949
Emissionsfläche in mm²	1,03 x 1,03

Die funktionale Abhängigkeit zwischen der Étendue und dem Emissionswinkel der LED, welcher in das optische System eingekoppelt werden soll, ist für die Boost HL LED in Abbildung 5.4 dargestellt. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben gilt, dass die Étendue des nachfolgenden optischen Elements gleich oder größer der Étendue der Boost HL LED sein muss, um die von der LED emittierte Strahlung vollständig in das optische System einkoppeln zu können. Ist die Étendue des optischen Elements 3,33 mm²sr wird, unter Vernachlässigung von Grenzflächenverlusten, der gesamte Lichtstrom in Höhe von 949 lm in das optische System eingekoppelt. Eine kleinere Étendue des optischen Elements beispielsweise 1,33 mm²sr führt dazu, dass lediglich ein Lichtstrom in Höhe von 379,6 lm eingekoppelt wird.

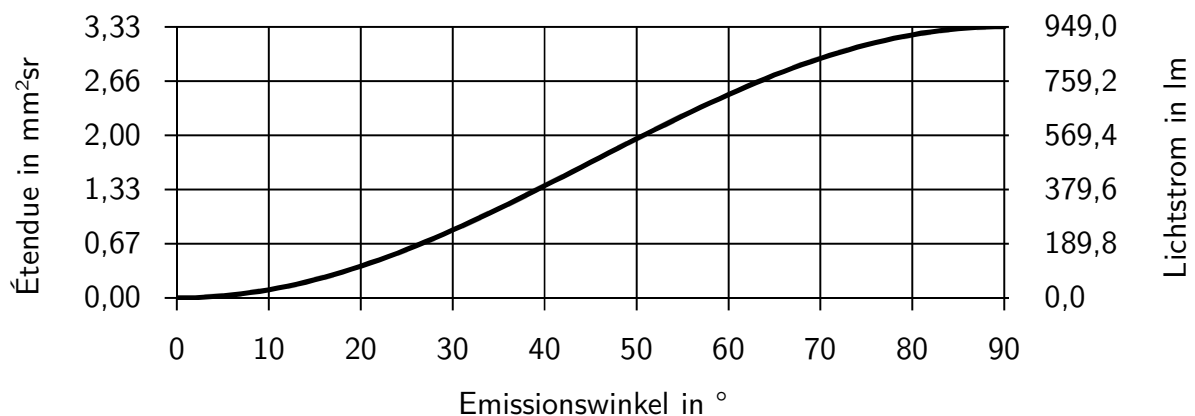


Abbildung 5.4: Korrelation zwischen Étendue, Emissionswinkel und Lichtstrom für die Boost HL LED

Im Hinblick auf die Étendue des DLP7000 mit $G_{\text{DLP7000}} = 18,26 \text{ mm}^2\text{sr}$ ergibt sich in Abhängigkeit des berücksichtigten Emissionswinkels eine variable Anzahl an LEDs, die zur Beleuchtung des DLP7000 eingesetzt werden können. Dieser Zusammenhang ist für verschiedene Emissionswinkel der Oslon® Boost HL LED in Abbildung 5.5 dargestellt. Hierbei ist bereits die temperaturbedingte Lichtstromreduktion von 949 lm auf 877 lm infolge der spezifizierten Sperrschichttemperatur von 70 °C berücksichtigt.

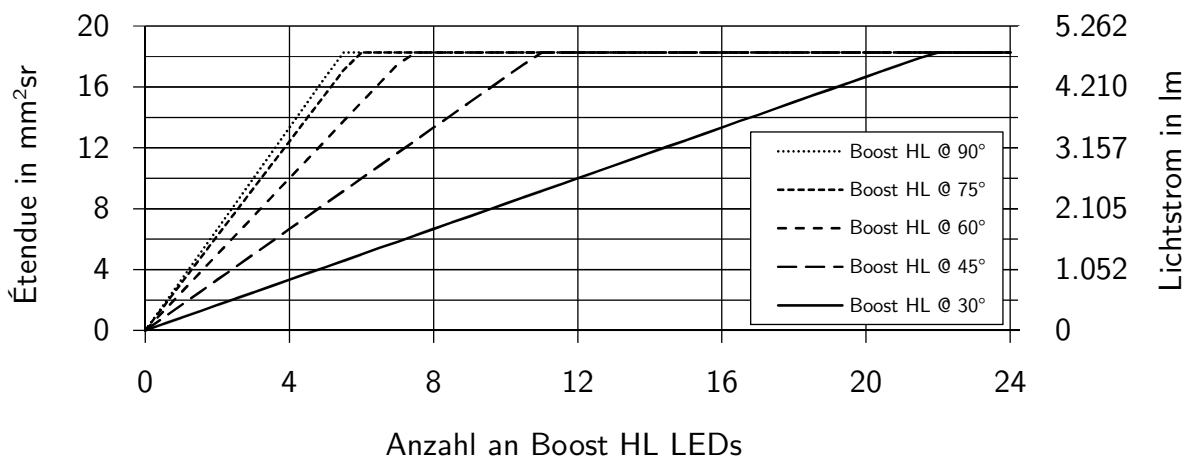


Abbildung 5.5: Korrelation zwischen Étendue und LED-Anzahl für verschiedene Emissionswinkel der Boost HL LED

Bei einem Emissionswinkel von $\pm 90^\circ$ können 5,5 Boost HL LEDs zur Beleuchtung des DLP7000 eingesetzt werden. Die Verwendung einer höheren LED-Anzahl ist bei diesem Emissionswinkel nicht zweckmäßig, da hierdurch die Étendue des DLP7000 überschritten wird und somit der zusätzliche Lichtstrom nicht moduliert werden kann. Wird lediglich ein Emissionswinkel von $\pm 30^\circ$ von dem nachfolgenden optischen Element in das System eingekoppelt, ist zur Ausnutzung der G_{DLP7000} die Verwendung von 21,9 Boost HL LEDs erforderlich. Beide Emissionswinkel sind für die Umsetzung eines LED-Arrays zur Beleuchtung des DLP7000 ungeeignet. Um das gesamte Licht der LED, welches unter einem Winkel von $\pm 90^\circ$ emittiert wird, in das System einkoppeln zu können, wären Linsen mit unendlich großem Durchmesser erforderlich. Bei einem Emissionswinkel von $\pm 30^\circ$ werden lediglich 25 % des maximal möglichen Lichtstroms einer jeden LED in das System eingekoppelt, sodass mit knapp 22 LEDs eine große und ineffiziente Lichtquelle umgesetzt würde.

Für die Festlegung eines geeigneten Emissionswinkels der in das System eingekoppelt werden soll, ist der FWHM-Wert eine hilfreiche Entscheidungsgröße (vgl. Abschnitt 2.1.3), weshalb dieser hier herangezogen wird. Bei Lambertstrahlern wie der Oslon[®] Boost HL LED ist dieser Wert $\pm 60^\circ$. Unter Vernachlässigung von Grenzflächenverlusten, kann so 75 % des Gesamtlichtstroms der LED genutzt werden (vgl. Abschnitt 2.1.3). Entsprechend der Abbildung 5.5 können zur Ausnutzung der G_{DLP7000} für die Beleuchtung 7,3 LEDs eingesetzt werden. Da es nur ganzzahlige LEDs gibt, wird die LED-Anzahl auf 8 LEDs aufgerundet. Der nutzbare Lichtstromanteil des LED-Arrays ist somit 4.801 lm, welches einem Lichtstrom pro Étendue von $262,92 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}$ entspricht und damit höher als die geforderten $171,38 \frac{\text{lm}}{\text{mm}^2\text{sr}}$ bei der DMD Auswahl ist.

Somit ist, neben der Wellenlängenüberlagerung der LE A P2W, LE CG P2A und LE B P2W LED unter Verwendung dichroitischer Elemente, der Einsatz eines zweidimensionalen LED-Arrays mit 8 Oslon® Boost HL in einer 2x4 Anordnung (Abbildung 5.6) zur Beleuchtung des DLP7000 geeignet.

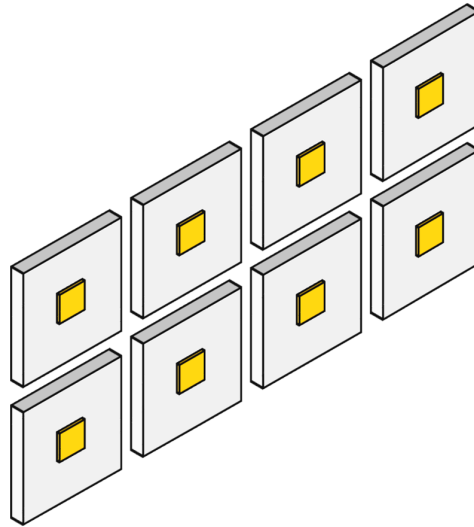


Abbildung 5.6: 2x4 Osram Oslon® Boost HL LED-Array

5.3.3 Bewerten und Auswählen eines Lichtquellenkonzepts

Für die Bewertung und Auswahl eines geeigneten Lichtquellenkonzepts zur Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers werden die in Tabelle 5.7 aufgeführten Bewertungskriterien herangezogen.

Tabelle 5.7: Bewertung von Lichtquellenkonzepten für einen DMD-Scheinwerfer

Lichterzeugung	Additive Farbmischung		Lumineszenz-konversion
	RGBW-LED	separate LEDs	LED-Array
Lichtquelle			
Bewertungskriterium			
Ausnutzung der Étendue	+	-	+
Maximaler Gesamtlichtstrom	-	+	o
Größe der Lichtquelle	+	-	o

Bei der Verwendung einer einzelnen RGBW-LED zur Beleuchtung des DLP7000 ist die Ausnutzung der Étendue mit gut (+) zu bewerten. Gleiches gilt für die Größe der Lichtquelle, da eine kompakte Lichtquelle umgesetzt werden kann. Der maximale Gesamtlichtstrom ist jedoch unzureichend (-), um den geforderten Lichtstrom von 1.400 lm in einem FOV von 40° x 15° zu erreichen, weshalb dieses Konzept ausgeschlossen wird.

Das Konzept der Wellenlängenüberlagerung unter Verwendung der LE A P2W, LE CG P2A und LE B P2W LED mithilfe dichroitischer Elemente ist im Hinblick auf die Ausnutzung der Étendue zur Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers als unzureichend (-) zu bewerten. Grund hierfür liegt in der erforderlichen Anpassung zur Erreichung eines Farborts im ECE-Farbraum, wodurch dieses Konzept durch Ineffizienz gekennzeichnet ist. Allerdings wird trotz der Ineffizienz mit diesem Konzept der höchste Gesamtlichtstrom erreicht, weshalb das Kriterium des maximalen Gesamtlichtstroms mit gut (+) bewertet wird. Der Einsatz dichroitischer Elemente und weiteren Elementen die zur Strahlformung und Homogenisierung erforderlich sind, führen jedoch zu einer großen Lichtquelle, welches zur Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers ungeeignet (-) ist.

Der Einsatz eines zweidimensionalen LED-Arrays mit 8 Oslon® Boost HL LEDs zur Beleuchtung des DLP7000 wird im Hinblick auf die Ausnutzung der Étendue mit gut (+) bewertet, da ähnlich wie beim RGBW-Konzept eine Übereinstimmung mit der G_{DLP700} erreicht wird. Der maximale Gesamtlichtstrom ist im Vergleich zu den anderen beiden Konzepten durchschnittlich (o) zu bewerten, wenngleich der zur Umsetzung erforderliche Lichtstrom erreicht wird. Gleiches gilt für die Größe der Lichtquelle, welche mit einem LED-Array deutlich kleiner umgesetzt werden kann, als bei der Wellenlängenüberlagerung mithilfe dichroitischer Elemente.

Auf Grundlage der Bewertung wird an dieser Stelle das LED-Array mit 8 Oslon® Boost HL LEDs als Lichtquellenkonzept zur Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers gewählt.

5.4 Systemarchitektur determinieren

Die auf der Reflexion basierende Lichtmodulation bei DMDs führt zu einem Bereich in kurzer Entfernung vor der aktiven Modulatorfläche, in dem eine Überschneidung des einfallenden und reflektierten Lichts resultiert. Zur Trennung des vom Beleuchtungssystem einfallenden und dem in das Projektionssystem reflektierten Lichts können zur Determinierung der Systemarchitektur unterschiedliche optische Elemente zur Strahlformung und -ablenkung eingesetzt werden. Bei der Applikation eines DMDs als Lichtmodulator lässt sich gemäß dem Strahlengang optischer Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.6) zwischen der telezentrischen und nicht-telezentrischen Architektur unterscheiden [ROEL10, TEXA10, SUN17]. Ein grundlegender Vorteil von Architekturen mit telezentrischem Strahlengang gegenüber Architekturen mit nicht-telezentrischem Strahlengang ist, dass Beleuchtungs- und Projektionssystem unabhängig voneinander entworfen werden können [TEXA10, PAN08]. Unter Berücksichtigung von Linsen als strahlformende optische Elemente für das Beleuchtungs- und Projektionssystem werden im Folgenden An-

sätze zur technischen Umsetzung der beiden Architekturen vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert.

5.4.1 Telezentrische Architektur

Für die technische Umsetzung einer Systemarchitektur mit telezentrischem Strahlengang eignen sich unterschiedliche Konzepte. Typischerweise werden entweder ein TIR-Prisma [TEXA10, SUN11, HUAN14, SUN17] oder eine Feldlinse [TEXA10, JIAN12] eingesetzt (Abbildung 5.7). Bezogen auf den Strahlengang des Projektionssystems handelt es sich bei einer Feldlinse um eine objektseitige Linse, welche zwischen DMD und Projektionssystem positioniert wird. DMD, Feldlinse und Projektionssystem sind dabei durch eine kongruente Lage der optischen Achsen gekennzeichnet. Charakteristisch bei der technischen Umsetzung einer telezentrischen Architektur unter Verwendung einer Feldlinse ist, dass die Feldlinse zugleich Teil des Beleuchtungssystems ist (vgl. Abbildung 5.7 (a)). Diese Besonderheit führt beim Entwerfen des Beleuchtungssystems zu Herausforderungen, da der dem Beleuchtungssystem zugeordnete Teil der Feldlinse außerhalb der optischen Achse vom DMD liegt. Um eine Kollision optischer Elemente zwischen Beleuchtungs- und Projektionssystem zu vermeiden und gleichzeitig eine möglichst kompakte Systemarchitektur umzusetzen, kann entweder wie in Abbildung 5.7 (a) dargestellt zwischen Beleuchtungssystem und Feldlinse [TEXA10] oder zwischen Feldlinse und Projektionssystem [JIAN12] ein Faltspiegel zur Strahlableitung eingesetzt werden.

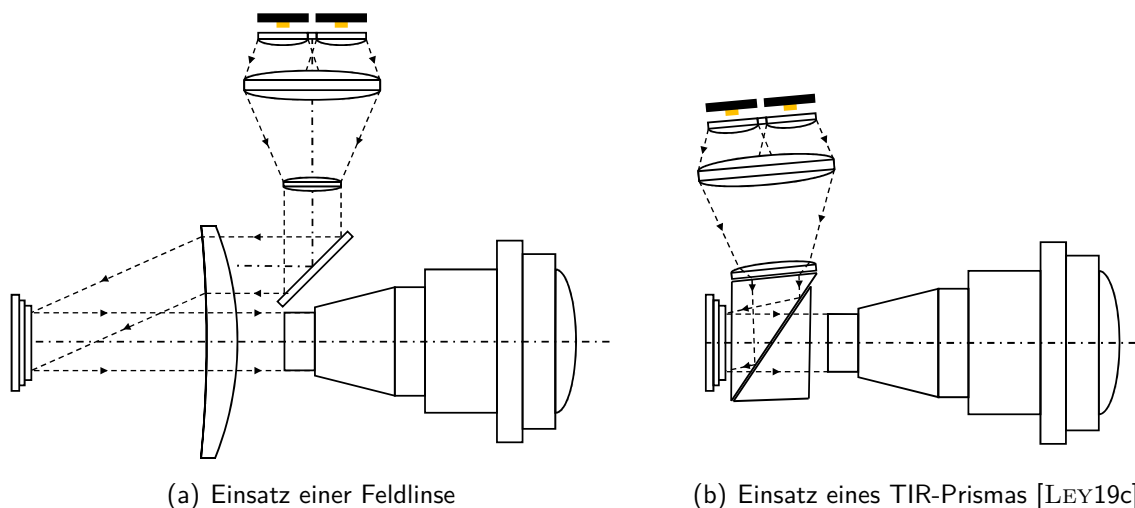


Abbildung 5.7: Konzepte zur technischen Umsetzung einer Systemarchitektur mit telezentrischem Strahlengang

Durch die Verwendung eines TIR-Prismas zur technischen Umsetzung einer telezentrischen Architektur wird sowohl die Realisierung einer sehr kompakten Systemarchitektur als auch der Einsatz einer geringstmöglichen Anzahl optischer Elemente zur Trennung des Beleuchtungs-

und Projektionssystem ermöglicht (Abbildung 5.7 (b)). Ausgehend von einer identischen Anzahl optischer Elemente zur Strahlformung beim Beleuchtungs- bzw. Projektionssystem ist bei der technischen Umsetzung einer telezentrischen Architektur mittels TIR-Prisma kein zusätzliches optisches Element wie der Spiegel bei der Feldlinse erforderlich. Weiterhin kann aufgrund der räumlich kompakten Anordnung von TIR-Prisma und DMD ein einzelnes optomechanisches Element zur Aufnahme beider Komponenten verwendet werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit eine präzise Ausrichtung von DMD und TIR-Prisma umzusetzen, wodurch das Auftreten von Lagefehlern wie Dezentrierung oder Verkippung zwischen DMD und TIR-Prisma reduziert wird. Der Luftspalt zwischen den beiden verkitteten Prismenhälften hat jedoch zur Folge, dass je Grenzfläche 2 – 3% Verluste auftreten [TEXA10]. Bezogen auf die Effizienz von 100% bei vollständiger Totalreflexion (vgl. Abschnitt 2.1.5) bedeutet dies eine Abnahme der Effizienz auf bis zu 94%. Ungeachtet dessen wird bei einem Effizienzvergleich zwischen TIR-Prisma und Feldlinse mit Planspiegel (92%, [NAUM14]) deutlich, dass unter Vernachlässigung auftretende Fresnelreflexionen an der optischen Eintritts- und Austrittsfläche des Prismas respektive der Feldlinse eine um 4% höhere Effizienz erreicht werden kann.

Um die Effizienz optischer Systeme unter Verwendung von TIR-Prismen weiter zu steigern, existieren unterschiedliche Schutzanmeldungen. So beschreibt MAES [MAES08] in seinem Patent *Dual TIR prism architecture to enhance DLP projectors* einen Ansatz für die Kopplung zweier Lichtquellen zur Beleuchtung eines oder mehrerer DMDs (vgl. Abschnitt 5.2) mithilfe eines sogenannten Doppel-TIR-Prismas (Abbildung 5.8). Dabei wird das von der Lichtquelle LQ1 emittierte Licht an der ersten Grenzfläche (GF1) des Doppel-TIR-Prismas auf den DMD totalreflektiert. Anschließend erfolgt die Reflexion des Lichts in das Projektionssystem über die im *On-State* befindlichen Mikrospiegel. Licht, welches auf Mikrospiegel im *Off-State* einfällt, wird nach dessen Reflexion infolge der Totalreflexion an der zweiten Grenzfläche (GF2) auf einen Absorber (A2) gelenkt (Strahlengang in Abbildung 5.8 nicht dargestellt).

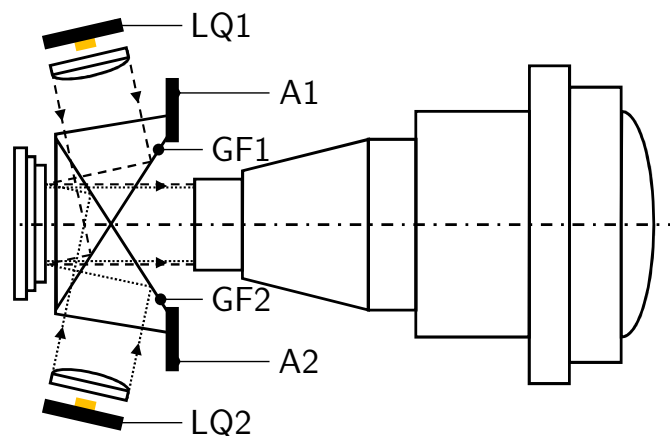


Abbildung 5.8: Kopplung zweier Lichtquellen mittels Doppel-TIR-Prisma nach [MAES08]

Das gleiche Funktionsprinzip wird in inverser Form für die zweite Lichtquelle (LQ2) genutzt. Licht, welches von der zweiten Lichtquelle (LQ2) emittiert wird, unterliegt an der Grenzfläche GF2 Totalreflexion. Das auf den DMD einfallende Licht wird jedoch aufgrund der Inversion von den im *Off-State* befindlichen Mikrospiegeln in das Projektionssystem reflektiert. Dementsprechend wird Licht, welches auf die im *On-State* befindlichen Mikrospiegeln trifft, nach Totalreflexion an der Grenzfläche GF1 auf einen Absorber (A1) gelenkt.

Damit in Abhängigkeit der Mikrospiegelposition kein unerwünschtes Licht in das Projektionssystem gelangt, ist für die beschriebene Funktionsweise ein zeitlich begrenzter und wechselnder Betrieb der Lichtquellen erforderlich. Wird ein wechselnder Betrieb mit einem Tastgrad (Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer [ROST13]) von 50 % eingestellt, in dem von jeder Lichtquelle 100 % Lichtstrom emittiert wird, kann, verglichen mit einem konventionellen Prisma, der Gesamtlichtstrom des Systems verdoppelt werden [MAES08]. Weiterhin ermöglicht der Einsatz von LEDs als Lichtquelle zusätzlich eine Steigerung des Gesamtlichtstroms. Grund hierfür resultiert aus der Erhöhung des Lichtstroms pro Étendue im gepulsten Betrieb [MURA05].

In dem Patent *Integrated TIR Prism and lens element* von PENN [PENN10] wird der Ansatz verfolgt die Anzahl optischer Elemente im System zu reduzieren. Um dies zu erreichen, wird wie in Abbildung 5.9 dargestellt eine Funktionsintegration von einem Prismenelement und einem plankonvexen Linsenelement bzw. zweier plankonvexer Linsenelemente zu einer sogenannten kombinierten Prismenlinse vorgeschlagen. Hierdurch kann der Einsatz einer Linse in kurzer Entfernung vor dem Prisma, wie es in Abbildung 5.7 (b) dargestellt ist, vermieden werden.

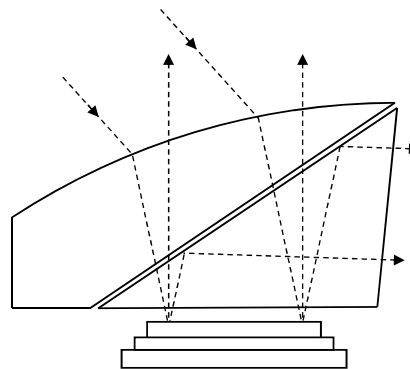


Abbildung 5.9: Funktionsintegriertes TIR-Prisma nach [PENN10]

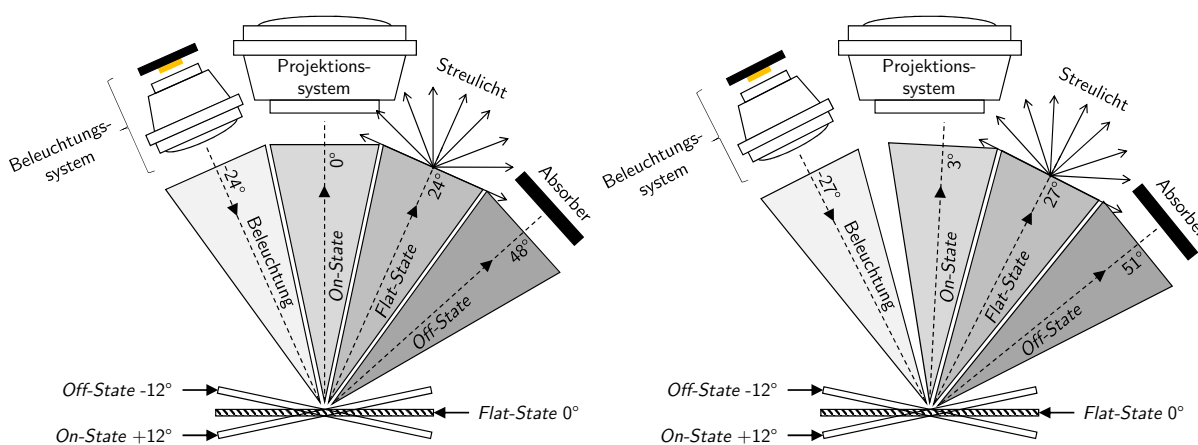
Die Totalreflexion wird dabei wie bei einem konventionellen TIR-Prisma durch einen Luftspalt zwischen den Planseiten des Prismen- und Linsenelements bzw. der beiden Linsenelemente gewährleistet. Entsprechend der Patentschrift kann durch die Applikation einer kombinierten Prismenlinse die optische Weglänge im System, der Herstellungsaufwand und die Herstellungskosten reduziert werden. Ein weiterer potentiell vorteilhafter Effekt, wenngleich dieser nicht

explizit in der Patentschrift erwähnt wird, ist die Reduktion auftretender Verluste im optischen System. Da jedes optische Element aufgrund von Fresnelreflexionen und Materialfehlern verlustbehaftet ist, kann der Einsatz einer kombinierten Prismenlinse zu einer Wirkungsgradsteigerung des optischen Systems beitragen.

5.4.2 Nicht-telezentrische Architektur

Allgemein sind bei Systemarchitekturen mit nicht-telezentrischem Strahlengang höhere Winkel zur Beleuchtung des DMDs erforderlich als bei Systemarchitekturen mit telezentrischem Strahlengang. Grund hierfür liegt in der Notwendigkeit eine ausreichende Trennung der Strahlengänge vom Beleuchtungs- und Projektionssystem zu erreichen [BHA15]. Unter bestimmten Voraussetzungen wird durch höhere Winkeln zur Beleuchtung des DMDs eine Steigerung des Systemkontrasts ermöglicht, da weniger Licht vom *Flat-State* in das Projektionssystem gestreut wird [MEUR03, TEXA10]. Dieses Streulicht wird durch Beugungseffekte an der unter den Mikrospiegeln befindlichen Durchkontaktierung (vgl. Abschnitt 2.1.4) und durch Streuung aufgrund von Oberflächenrauigkeiten der aluminiumbeschichteten Mikrospiegel hervorgerufen [DEWA03].

In Abbildung 5.10 (a) ist die Ausgangssituation, in der Licht vom *Flat-State* in das Projektionssystem gestreut wird, dargestellt. Mit zunehmendem Beleuchtungswinkel wird eine stärkere Trennung der Strahlengänge vom Beleuchtungs- und Projektionssystem und dadurch eine entsprechende Verschiebung des vom *Flat-State* verursachten Streulichts erreicht (Abbildung 5.10 (b)). Folglich gelangt weniger Streulicht in das Projektionssystem.



(a) Ausgangsbeleuchtungswinkel ohne Winkelerhöhung

(b) Erhöhung des Beleuchtungswinkels um 3°

Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen Beleuchtungswinkel und dem in das Projektionssystem gestreuten Lichtanteil vom *Flat-State*

MEURET ET AL. [MEUR03] konnten in Versuchen mit einem DMD (Kippwinkel $\pm 10^\circ$) nachweisen, dass durch eine Winkelerhöhung von 3° zur Beleuchtung des DMDs eine Steigerung des Systemkontrasts um 29 % ermöglicht wird. Diese Winkelerhöhung resultiert jedoch gleichzeitig in einer 15 %-igen Reduktion des nutzbaren Lichtstroms. DEWALD ET AL. [DEWA03] führen für eine "signifikante" Zunahme des Systemkontrasts vergleichbare Winkelerhöhungen von 2 bis 3° , sowohl für DMDs mit $\pm 10^\circ$ als auch $\pm 12^\circ$ Kippwinkel, an. Auch hier tritt infolge der Erhöhung des Beleuchtungswinkels eine Reduktion des nutzbaren Lichtstroms auf. Die Lichtstromreduktion ist dabei auf die unveränderte Position der Eintrittspupille vom Projektionssystem zurückzuführen, wodurch ein Teil des vom *On-State* reflektierten Lichts am Projektionssystem vorbeigestrahlt wird (vgl. Abbildung 5.10 (a) und (b)). Eine Vergrößerung der Eintrittspupille würde eine Reduktion der auftretenden Lichtstromverluste bewirken, gleichzeitig jedoch wieder den Anteil unerwünschter Streustrahlung vom *Flat-State* in das Projektionssystem erhöhen [MEUR03].

Abgesehen von den auftretenden Lichtstromverlusten beim Projektionssystem wird aufgrund höherer Beleuchtungswinkel zusätzlich die Étendue des DMDs reduziert [BHAK15]. In Bezug auf Gleichung 2.22 entspricht die Erhöhung des Beleuchtungswinkels einer zusätzlichen Verkipfung der zu beleuchtenden Modulatorfläche. So ergibt sich bei einer Winkelerhöhung um 3° zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 die Étendue zu

$$G_{\text{DLP7000}} = \pi \cdot (0,01368 \text{ mm})^2 \cdot (1.024 \cdot 768) \cdot \cos(27^\circ) \cdot \sin^2(12^\circ) = 17,81 \text{ mm}^2\text{sr}. \quad (5.10)$$

Dies entspricht einer Reduktion des nutzbaren Lichtstroms um 2,5 % gegenüber einer Systemarchitektur mit telezentrischem Strahlengang ($G_{\text{DLP7000}} = 18,2 \text{ mm}^2\text{sr}$, vgl. Abschnitt 5.2). Bedingt durch die Étenduereduktion und den Lichtstromverlusten beim Projektionssystem sind Systemarchitekturen mit nicht-telezentrischem Strahlengang gegenüber Systemarchitekturen mit telezentrischem Strahlengang grundsätzlich durch eine 5 – 10 % geringere Effizienz gekennzeichnet [KUNZ00, TEXA10]. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades sind für die technische Umsetzung von Systemarchitekturen mit nicht-telezentrischem Strahlengang daher insbesondere Konzepte vorteilhaft, bei denen zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche keine zusätzlichen optischen Elemente zur Strahlablenkung benötigen werden.

Herausfordernd bei einer nicht-telezentrischen Systemarchitektur mit direkter Beleuchtung ohne optische Elemente zur Strahlablenkung ist die Größe der Lichtquelle. Wie in Abbildung 5.11 (a) dargestellt sind Beleuchtungs- und Projektionssystem räumlich nah zueinander angeordnet. Mit zunehmender Größe der Lichtquelle kann bei gleichbleibendem Beleuchtungswinkel eine Kollision der beiden optischen Systeme auftreten. Um dies zu vermeiden kann der

Beleuchtungswinkel weiter erhöht werden. Jeder zusätzlicher Grad Winkelerhöhung führt jedoch unweigerlich zu einer sukzessiven Reduktion der nutzbaren Étendue (vgl. Gleichung 5.10) und dementsprechend zu einem geringeren Systemwirkungsgrad. Daher ist unter bestimmten Voraussetzungen bei der Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche der Einsatz optischer Elemente zur Strahlableitung beispielsweise Planspiegel gegenüber einer direkten Beleuchtung effizienter (Abbildung 5.11 (b)).

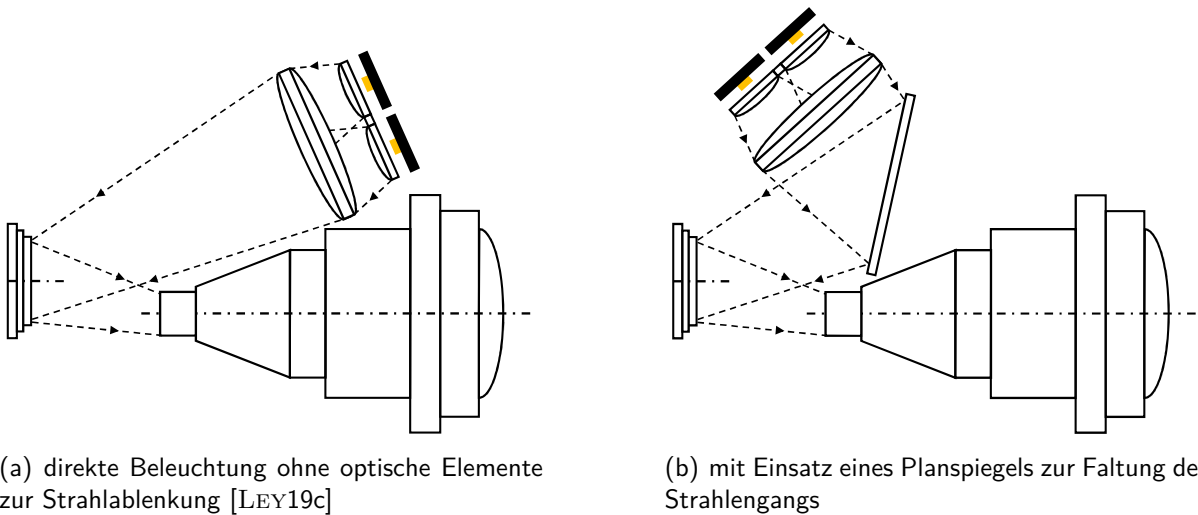


Abbildung 5.11: Konzepte zur technischen Umsetzung einer Systemarchitektur mit nicht-telezentrischem Strahlengang

Das Konzept der direkten Beleuchtung nutzen BHAKTA ET AL. [BHA15], um das Licht einer einzelnen LED mithilfe des Beleuchtungssystems unter einem Winkel von $34,5^\circ$ auf den DMD zu lenken. UHLENBERG ET AL. [UHLE19] hingegen setzen zwischen Beleuchtungssystem und DMD einen Planspiegel als zusätzliches optisches Element zur Faltung des Strahlengangs ein, um die aktive Modulatorfläche mit zwei LEDs zu beleuchten.

In Bezug auf den DLP7000 wird im Folgenden für die nicht-telezentrische Systemarchitektur analysiert, ab welchem Grenzwinkel zur Beleuchtung des DMDs (α_{Grenz}) der Einsatz eines Planspiegels als optisches Element zur Strahlableitung zu einem Effizienzvorteil gegenüber der direkten Beleuchtung führt. Da wie eingangs erwähnt bei nicht-telezentrischen Systemarchitekturen höhere Winkel zur Beleuchtung des DMDs erforderlich sind, wird als Ausgangssituation die Étendue aus Gleichung 5.10 (Beleuchtungswinkel 27°) festgelegt. Weiterhin werden das Beleuchtungs- und Projektionssystem als ideal und der Wirkungsgrad des Planspiegels mit 92% [NAUM14] angenommen. Mithilfe der Gleichung 2.22 ergibt sich der Grenzwinkel zur Beleuchtung nach umstellen und einsetzen der Werte zu

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \cos \left(\frac{17,81 \text{ mm}^2 \text{sr} \cdot 0,92}{\pi \cdot (0,01368 \text{ mm})^2 \cdot (1.024 \cdot 768) \cdot \sin^2(12^\circ)} \right) = 34,91^\circ. \quad (5.11)$$

In Bezug auf die Étendue kann somit unter Verwendung eines Planspiegels, der exakt zwischen Beleuchtungssystem und DMD ausgerichtet ist und einen Wirkungsgrad von 92 % hat, ab einem Grenzwinkel von $\alpha_{\text{Grenz}} = 34,91^\circ$ ein effizienteres System, verglichen mit einer direkten Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche, umgesetzt werden.

5.4.3 Bewerten und Auswählen einer Systemarchitektur

Die Bewertung der verschiedenen Möglichkeiten zur Umsetzung telezentrischer und nicht-telezentrischer Systemarchitekturen erfolgt in Bezug auf die Realisierung eines DMD-Scheinwerfers, sodass für andere Anwendungsbereich abweichende Bewertungskriterien relevant sein können. Wie bereits bei den Konzepten zur Lichtmodulation werden die Kriterien Étendue, kompakte Anordnung und geringe Systemkomplexität verwendet. In Tabelle 5.8 ist eine Bewertungsübersicht der verschiedenen Konzepte zusammengefasst.

Tabelle 5.8: Konzeptbewertung zur Umsetzung verschiedener Systemarchitekturen für einen DMD-Scheinwerfer

opt. Element zur Umsetzung	Telezentrische Systemarchitektur				Nicht-telezentrische Systemarchitektur	
	TIR Prisma	Doppel TIR-Prisma	Integriertes TIR-Prisma	Feldlinse + Planspiegel	Direkte Beleuchtung	Plan- spiegel
Bewertungs- kriterium						
Ausnutzung der Étendue	+	+	+	+	-	-
Kompakte Anordnung	+	-	+	-	+	+
Geringe System- komplexität	o	-	o	-	+	o

Im Hinblick auf die Ausnutzung der Étendue sind alle Ansätze zur Umsetzung einer telezentrischen Systemarchitektur mit gut (+) zu bewerten, da diese maximal genutzt werden kann. Umgekehrt führt die Reduktion der Étendue bei nicht-telezentrischen Systemarchitekturen zu einer schlechten (-) Bewertung.

Der Einsatz eines TIR-Prismas bzw. integrierten TIR-Prismas zur Umsetzung einer telezentrischen Systemarchitektur ermöglicht eine kompakte Anordnung der optischen Elemente. Gleiches gilt für die beiden nicht-telezentrischen Systemarchitekturen, sodass alle vier Möglichkeiten mit gut (+) bewertet werden. Bei Verwendung eines Doppel-TIR-Prismas wird nach dem Patent von PENN [PENN10] auf beiden Seiten des Prismas eine Lichtquelle mit Beleuchtungssystem angeordnet, sodass eine weniger kompakte Anordnung möglich ist. Auch

der kombinierte Einsatz einer Feldlinse mit Planspiegel führt im Vergleich zu den anderen Ansätzen zu einer weniger kompakten Anordnungen der optischen Elemente, sodass beide Ansätze für die Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers weniger gut (-) geeignet sind.

Die geringste Systemkomplexität wird mit einer nicht-telezentrischen Systemarchitektur durch eine direkte Beleuchtung des DMDs erreicht, weshalb dieses Konzept mit gut (+) bewertet wird. Durchschnittlich (o) zu bewerten sind sowohl die Verwendung eines TIR-Prismas und integrierten TIR-Prismas für eine telezentrische Systemarchitektur als auch die Verwendung eines Planspiegels für eine nicht-telezentrische Systemarchitektur. Grund hierfür ist der erforderliche Einsatz eines zusätzlichen optischen Elements zur Beleuchtung des DMDs. Beim Doppel-TIR-Prisma sind, abgesehen von dem Prisma selbst, zwei optische Systeme zur Beleuchtung des DMDs erforderlich. Die Verwendung identischer Lichtquellen vereinfacht zwar den Entwurfsaufwand, jedoch sind für den Betrieb die Spiegelzustände (*On-State* bzw. *Off-State*) mit den Lichtquellen zu synchronisieren. Daher wird das Bewertungskriterium der geringen Systemkomplexität mit (-) bewertet. Die gleiche Bewertung wird dem Konzept mit Feldlinse und Planspiegel vergeben, da auch hier mit zunehmender Anzahl optischer Elementen die Systemkomplexität steigt.

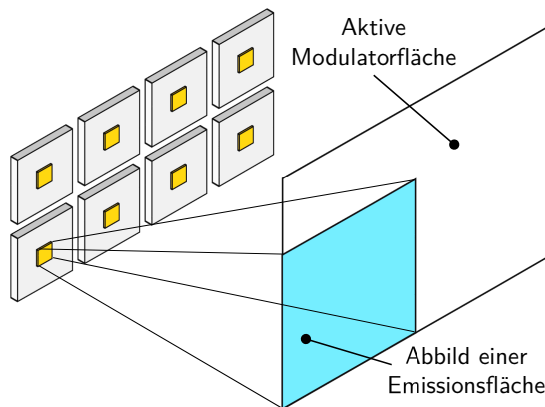
Für die weitere Konzipierung des DMD-Scheinwerfers eignen sich auf Grundlage der Bewertungskriterien insbesondere die telezentrische Systemarchitektur mit integriertem TIR-Prisma nach PENN sowie mit einem kommerziellen TIR-Prisma. Das integrierte TIR-Prisma erfordert jedoch eine Neuentwicklung, wohingegen das kommerzielle TIR-Prisma in verschiedenen Größen breit verfügbar ist. Aus diesem Grund wird sich für das kommerzielle TIR-Prisma entschieden.

5.5 Beleuchtungsstrategie definieren

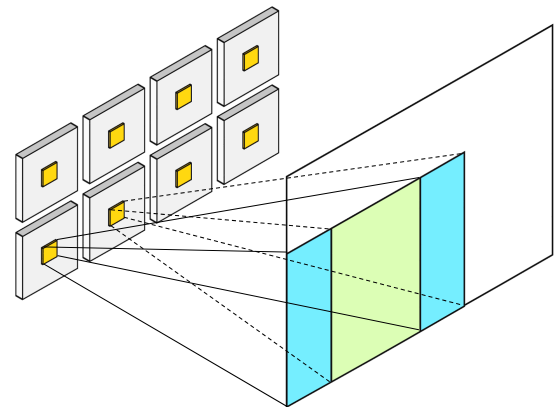
In dem Konzipierungsschritt „Beleuchtungsstrategie definieren“ werden Strategien zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 diskutiert und eine geeignete Strategie für die weitere Konzipierung festgelegt. Primär können die Beleuchtungsstrategien in abbildend und nichtabbildend klassifiziert werden. Sekundär lässt sich weiterhin zwischen homogener und inhomogener Beleuchtung differenzieren. In Abschnitt 5.5.1 werden zunächst verschiedene Konzepte zur abbildenden Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird in Abschnitt 5.5.2 auf Konzepte zur nichtabbildenden Beleuchtung eingegangen.

5.5.1 Abbildende Beleuchtungsstrategien

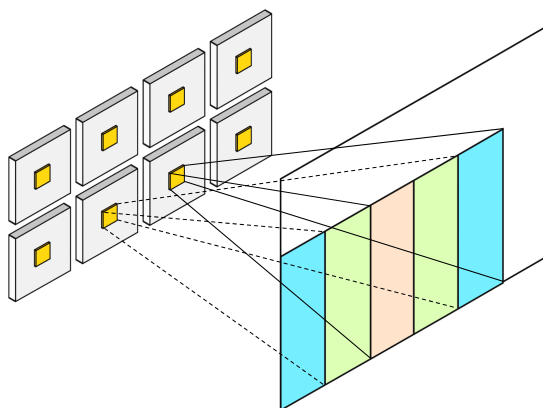
Das Ziel abbildender Beleuchtungsstrategien ist, durch Überlagerung der einzelnen Emissionsflächenabbilder der Lichtquellen, in diesem Fall der acht Boost HL LEDs, eine für den DMD-Scheinwerfer vorteilhafte Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche zu erzeugen. Verdeutlicht wird diese Strategie in Abbildung 5.12 (a)-(d) in der sukzessive die Abbilder der Emissionsflächen einer einzelnen Reihe des LED-Arrays mit einem konstanten Abbildungsmaßstab versetzt zueinander auf der aktiven Modulatorfläche überlagert werden. Durch die versetzte Überlagerung der Abbilder wird eine inhomogene Verteilung der Beleuchtungsstärke auf der aktiven Modulatorfläche erreicht. Bereiche mit einfacher Beleuchtungsstärke sind blau gekennzeichnet und Bereiche mit dreifacher Beleuchtungsstärke orange.



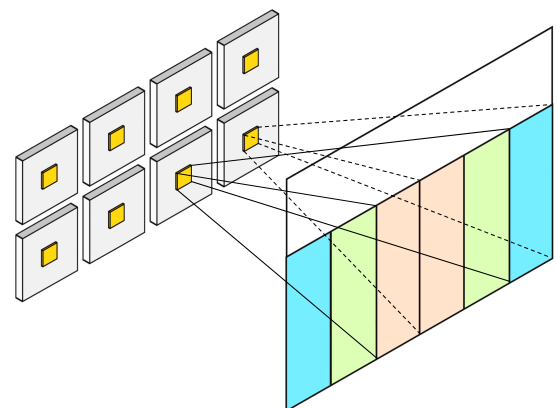
(a) Abbild einer Emissionsfläche



(b) Versetzte Überlagerung von zwei Abbildern



(c) Versetzte Überlagerung von drei Abbildern

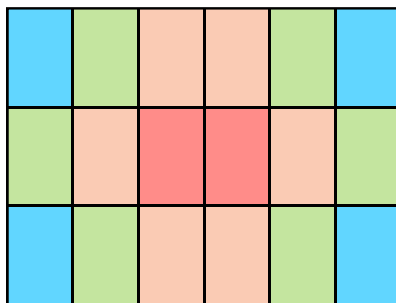


(d) Versetzte Überlagerung von vier Abbildern

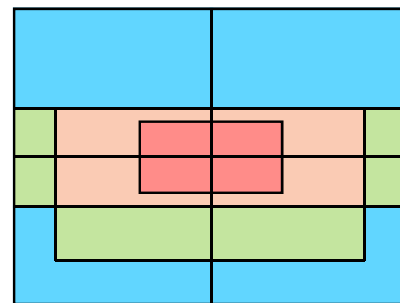
Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der abbildenden Beleuchtungsstrategie mit konstantem Maßstab der Emissionsflächenabbilder auf der aktiven Modulatorfläche für eine einzelne Reihe des Boost HL LED-Arrays

Abbildende Beleuchtungsstrategien sind insbesondere im Hinblick auf die Systemeffizienz vorteilhaft, da diese durch Abschalten einzelner LEDs oder ganzer LED-Reihen nicht genutzter Bereiche auf der aktiven Modulatorfläche gesteigert werden kann. So ist die Erzeugung einer

Abblendlichtverteilung wie sie in Abbildung 2.19 (Abschnitt 2.3.1) dargestellt ist, potenziell unter Verwendung einer einzelnen Reihe des LED-Arrays (Abbildung 5.12 (d)) bei konstantem Abbildungsmaßstab der Emissionsflächen realisierbar. Eine Fernlichtverteilung wird durch Zuschalten der zweiten LED-Reihe erreicht, sodass die in Abbildung 5.13 (a) dargestellte Beleuchtungsstärkeverteilung erzeugt wird. Im Vergleich zu den Eckbereichen der aktiven Modulatorfläche (blau) wird hierdurch in der Mitte (rot) eine sechsfache Beleuchtungsstärke erreicht. Alternativ zur abbildenden Beleuchtung mit konstantem Abbildungsmaßstab besteht die Möglichkeit die Emissionsflächen mit einem individuellen Abbildungsmaßstab auf der aktiven Modulatorfläche abzubilden, welches in Abbildung 5.13 (b) dargestellt ist. Der wesentliche Vorteil von Beleuchtungsstrategien mit konstantem Abbildungsmaßstab gegenüber Strategien mit individuellem Abbildungsmaßstab ist der vielfache Einsatz eines abbildenden optischen Systems für die einzelnen LEDs des LED Array.



(a) Konstanter Abbildungsmaßstab



(b) Individueller Abbildungsmaßstab

Abbildung 5.13: Abbildende Beleuchtungsstrategien durch Überlagerung von Emissionsflächenabbildern auf der aktiven Modulatorfläche

Herausforderungen bei abbildenden Beleuchtungsstrategien ergeben sich insbesondere durch die Toleranzsensitivität gegenüber fertigungs- und ausrichtungsbedingter Abweichungen der optischen Elemente zur Strahlformung und dem ungleichmäßigen Wärmeeintrag auf der aktiven Modulatorfläche. Letzteres kann bei unzureichender Kühlung zu einer Beschädigung einzelner Mikrospiegel oder des gesamten Lichtmodulators führen. Grund hierfür ist, dass der Absorptionskoeffizient eines DMDs unter anderem von der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche abhängig ist. Weiterhin wird die Absorption von der Position der Mikrospiegel beeinflusst, welche im *Off-State* größer als im *On-State* ist [TEXA19a].

Im Hinblick auf die Toleranzsensitivität können Abweichungen des Linsenradius oder der Linsendicke zu unscharfen Abbildern der Emissionsflächen auf der aktiven Modulatorfläche führen. Eine mehr oder weniger präzise Beleuchtung der Zielbereiche auf der aktiven Modulatorfläche wird durch Positionierungenauigkeiten beim Ausrichten der optischen Elemente hervorgerufen. Aus diesem Grund ist insbesondere ein Beleuchtungssystem mit telezentrischem Strahlengang

vorteilhaft, da eine Verschiebung der Lichtquelle (objektseitig) entlang der optischen Achse im Idealfall keine bzw. nur geringe Auswirkungen auf den Abbildungsmaßstab (bildseitig) hat. Bei einem Beleuchtungssystem mit nicht-telezentrischem Strahlengang werden bei einer Verschiebung der Lichtquelle entlang der optischen Achse Abbilder mit unterschiedlichen Maßstäben auf der aktiven Modulatorfläche erzeugt. Dementsprechend werden diese bei der Projektion in den Verkehrsraum verzerrt abgebildet. Weiterhin erfolgt unter Verwendung rotationssymmetrischer Linsen für das Beleuchtungssystem bei Positioniergenauigkeiten entlang der optischen Achse eine Über- oder Unterbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche, welches negative Auswirkungen auf die Systemeffizienz hat.

Der Einsatz eines TIR-Prismas zur Umsetzung eines Beleuchtungssystems mit telezentrischem Strahlengang führt bei abbildenden Beleuchtungsstrategien neben der Toleranzsensitivität gegenüber fertigungs- und ausrichtungsbedingte Abweichungen zu weiteren Herausforderungen. Da die aktive Modulatorfläche im Verhältnis zur Größe des LED-Arrays sehr klein ist, ist für die Überlagerung der einzelnen Emissionsflächenabbilder eine zum TIR-Prisma winkelige Anordnung der einzelnen LEDs und optischen Elemente erforderlich. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 5.14 für eine einzelne Reihe des 2x4 Boost HL LED-Array dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden in der Abbildung lediglich die Hauptstrahlen von LED 2 und LED 4 betrachtet. Die winkelige Anordnung der LEDs hat an der Grenzfläche der beiden Prismenhälften unterschiedliche Auftreffwinkel der Hauptstrahlen zur Folge. Wird der materialspezifische Grenzwinkel bei dem Totalreflexion auftritt unterschritten, erfolgt keine Totalreflexion der Strahlen auf die aktive Modulatorfläche.

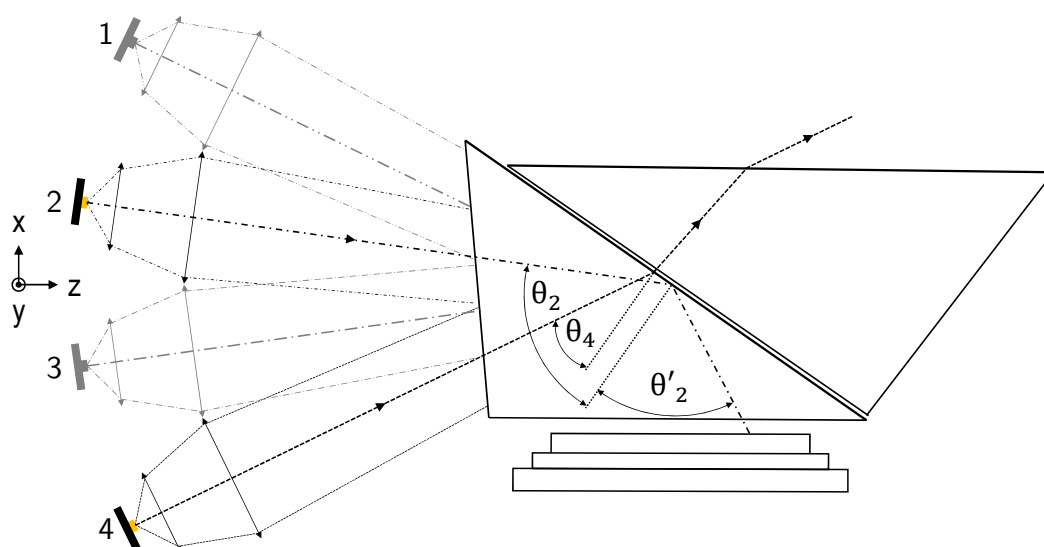


Abbildung 5.14: x-z-Ebene der winkelig angeordneten LEDs für eine abbildende Beleuchtung des DLP7000 unter Verwendung eines TIR-Prismas nach [LEY19c]

In der Regel wird für TIR-Prismen Borosilikat-Kronglas als Material eingesetzt, welches bei einer Wellenlänge von 632,8 nm einen Brechungsindex von $n_1 = 1,515$ hat [SCHO14]. Luft als Medium zwischen den beiden Prismenhälften hat einen Brechungsindex von $n_2 = 1$, sodass der Grenzwinkel unter dem Totalreflexion (θ_{TIR}) auftritt mithilfe des snelliusschen Brechungsgesetzes zu

$$\theta_{\text{TIR}} = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1,515}{1} \right) = 40,3^\circ \quad (5.12)$$

bestimmt werden kann. Lichtstrahlen, welche unter einem Winkel kleiner als θ_{TIR} auf die Grenzfläche treffen wie der Hauptstrahl von LED 4 werden nicht totalreflektiert und folglich auch nicht auf die aktive Modulatorfläche gelenkt. Als Streustrahlung im System wird von diesen Lichtstrahlen zum einen die Systemeffizienz und zum anderen der Kontrast, sowohl auf der aktiven Modulatorfläche als auch bei der Projektion im Verkehrsraum, reduziert.

5.5.2 Nichtabbildende Beleuchtungsstrategien

Alternativ zu den Strategien der abbildenden Beleuchtung lässt sich die aktive Modulatorfläche auch nichtabbildend beleuchten. Hier kann im Wesentlichen, wie in Abbildung 5.15 dargestellt, zwischen der homogenen und inhomogenen Beleuchtung differenziert werden. Bei einer homogenen Beleuchtung wird eine über der aktiven Modulatorfläche konstante Beleuchtungsstärkeverteilung erzeugt, wohingegen die inhomogene Beleuchtung durch eine ortsvariante Verteilung der Beleuchtungsstärke gekennzeichnet ist. Auch KAUSCHKE [KAUS06] und GUT [GUT14] diskutieren die inhomogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche als Maßnahme zur Steigerung des Systemwirkungsgrads von DMD-Scheinwerfern. Nach GUT [GUT14] lässt sich der Wirkungsgrad einer Fernlichtverteilung mit einer gaußförmigen Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche gegenüber einer homogenen Verteilung von 4,6% auf 12,1% steigern.



(a) Homogene Beleuchtung



(b) Inhomogene Beleuchtung

Abbildung 5.15: Nichtabbildende Strategien zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche

Sowohl bei der homogenen als auch bei der inhomogenen Beleuchtung wird bei der Verwendung rotationssymmetrischer optischer Elemente zur Strahlformung eine Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche erzeugt. GUT [GUT14] erwartet bei einer inhomogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche mit gaußförmiger Verteilung einen Lichtstromverlust von 20 %. Bei einer homogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche sind die Lichtstromverluste infolge der Überbeleuchtung geringer und werden mit bis zu 16 % angegeben [TEXA19c].

Bei beiden nichtabbildenden Strategien wirkt sich die Überbeleuchtung vorteilhaft auf die Toleranzsensitivität gegenüber fertigungs- und ausrichtungsbedingter Abweichungen der optischen Elemente zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche aus. Bei Positionierungsgenauigkeiten entlang der optischen Achse ist erst bei sehr großen Abweichungen zum Ideal ein negativer Einfluss zu erwarten. Allerdings ist die Strategie der inhomogenen Beleuchtung etwas toleranzsensitiver, da ausrichtungsbedingte Abweichungen zu einer ungewollten lokalen Variation der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche führen können.

Der ungleichmäßige Wärmeeintrag auf der aktiven Modulatorfläche bei der nichtabbildenden inhomogenen Beleuchtungen hat eine vergleichbar negative Auswirkung wie bei den abbildenden Beleuchtungsstrategien. Da die homogene Beleuchtungsstrategie dem Standard entspricht, sind hier keine negativen Auswirkungen im Hinblick auf die Lebensdauer des DMDs zu erwarten.

5.5.3 Bewerten und Auswählen einer Beleuchtungsstrategie

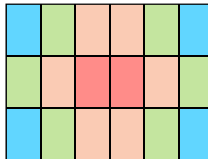
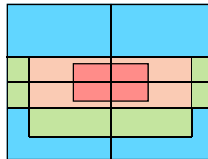

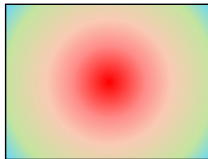
Die Bewertung der verschiedenen Beleuchtungsstrategien erfolgt im Hinblick auf die Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche und den Wärmeeintrag. Als drittes Kriterium wird die Toleranzsensitivität der Beleuchtungsstrategie gegenüber fertigungs- und ausrichtungsbedingter Abweichungen der optischen Elemente zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche bewertet. Die Bewertungsübersicht kann der Tabelle 5.9 entnommen werden.

Bei einer präzisen Ausrichtung der optischen Elemente zur Strahlformung lässt sich mit den abbildenden Beleuchtungsstrategien eine geringe Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche sehr gut (++) erreichen. Bei den nichtabbildenden Beleuchtungsstrategien wird die homogene Beleuchtung durchschnittlich (o) bewertet, da die aktive Modulatorfläche überbeleuchtet wird, diese jedoch geringer als bei einer inhomogenen Beleuchtung (-) ist.

Der Wärmeeintrag auf der aktiven Modulatorfläche wird von allen Strategien bei denen eine inhomogene Beleuchtungsstärkeverteilung erzeugt wird negativ beeinflusst. Durch die hohen Intensitäten werden lokale Temperaturspitzen erzeugt, die den Lichtmodulator bzw. die Mikro-

spiegel beschädigen können. Insbesondere bei der abbildenden Beleuchtung mit individuellem Abbildungsmaßstab werden hohe lokale Temperaturspitzen hervorgerufen, sodass die Bewertung mit ungenügend (--) erfolgt. In Abhängigkeit des Verteilungsprofils bei der nichtabbildenden inhomogenen Beleuchtung sind die Temperaturspitzen weniger stark ausgeprägt. Gleiches gilt bei der abbildenden Beleuchtung mit konstantem Abbildungsmaßstab, sodass beide Strategien mit (-) bewertet werden. Eine homogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche wird aufgrund des gleichmäßigen Wärmeeintrags mit sehr gut (++) bewertet.

Tabelle 5.9: Bewertung von Strategien zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche eines DMD-Scheinwerfers nach [LEY18b]

	Beleuchtungsstrategie			
	Abbildend		Nichtabbildend	
				
Bewertungskriterium				
Geringe Überbeleuchtung	++	++	o	-
Wärmeeintrag auf Modulatorfläche	-	--	++	-
Geringe Toleranzsensitivität	o	-	++	+

Die Toleranzsensitivität abbildender Beleuchtungsstrategien ist, wie in Abschnitt 5.5.1 erläutert, grundsätzlich höher als bei nichtabbildenden Strategien. Bei einer ausreichend großen Überlagerung der Emissionsflächenabbilder auf der aktiven Modulatorfläche ist die abbildende Beleuchtungsstrategie mit konstantem Abbildungsmaßstab gegenüber jener mit individuellem Abbildungsmaßstab jedoch weniger sensitiv. Grund hierfür ist, dass ausrichtungsbedingte Abweichungen der optischen Elemente zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche besser kompensiert werden können.

Die nichtabbildende homogene Beleuchtung wird mit sehr gut (++) bewertet, da lediglich bei sehr großen fertigungs- und ausrichtungsbedingten Abweichungen negative Auswirkungen bei der Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche zu erwarten sind. Auch die nichtabbildende inhomogene Beleuchtung ist durch eine geringe Toleranzsensitivität gekennzeichnet. Allerdings können fertigungs- und ausrichtungsbedingte Abweichungen dazu führen, dass lokale Variationen der Beleuchtungsstärkeverteilung auftreten. Daher wird diese mit gut (+) bewertet.

Auf Grundlage der Bewertungskriterien ist für die Umsetzung eines DMD-Scheinwerfers eine nichtabbildende homogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche vorteilhaft und wird daher auch zur weiteren Konzipierung gewählt. Grundsätzlich ist jedoch an dieser Stelle zu erwähnen, dass durch die Beleuchtungsstrategie die Verzeichnung des optischen Systems zur Projektion in den Verkehrsraum maßgeblich beeinflusst wird. Dies wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

5.6 Verzeichnung abstimmen

In dem Konzipierungsschritt „Verzeichnung abstimmen“ wird unter Berücksichtigung der gewählten Strategie zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche die Verzeichnung für das optische System zur Projektion in den Verkehrsraum abgestimmt. Als Abbildungsfehler optischer Systeme wird von der Verzeichnung keine Unschärfe sondern eine Verzerrung des projizierten Bildes hervorgerufen, welches zu einem ortsvarianten Abbildungsmaßstab führt [PEDR05, HERI17b]. In der klassischen Photographie ist eine Verzeichnung des Bildes unerwünscht, sodass Maßnahmen zur Korrektur wie der Einsatz von Korrekturlinsen oder durch nachträgliche digitale Bildbearbeitung erfolgen. Andererseits gibt es Anwendungsbereiche wie die Film- und Videotechnik in denen eine gezielte Verzeichnung des Bildes hervorgerufen wird, um ein Breitbildformat zu erzeugen.

Zur Ausleuchtung des FOVs von $40^\circ \times 15^\circ$ ist für das optische System zur Projektion in den Verkehrsraum eine verzeichnende Abbildung des DLP7000 erforderlich. Grund hierfür ist das abweichende Seitenverhältnis von FOV (2,6:1) und DLP7000 (4:3). Für den DMD-Scheinwerfer eignen sich in Abhängigkeit der definierten Beleuchtungsstrategie im Wesentlichen die anamorphotische Verzeichnung, wie sie in der Film- und Videotechnik eingesetzt wird, oder die radiale Verzeichnung um das FOV auszuleuchten.

Anamorphotische Verzeichnung

Bei der anamorphotischen Verzeichnung, wie sie in Abbildung 5.16 dargestellt ist, erfolgt eine Variation des Abbildungsmaßstabs in x- und/oder y-Richtung, sodass das Abbild im Verkehrsraum gestaucht und/oder gestreckt wird. KAUSCHKE [KAUS06], GÜNTHER [GÜNT10] und BHAKTA [BHAK15] nutzen in ihren Arbeiten die anamorphotische Verzeichnung zur Anpassung des Seitenverhältnisses. Sowohl KAUSCHKE als auch GÜNTHER setzen zur Erzeugung der anamorphotischen Verzeichnung jeweils zwei Zylinderlinsen ein. BHAKTA verwendet eine Zylinderlinse und eine anamorphotische Asphäre.

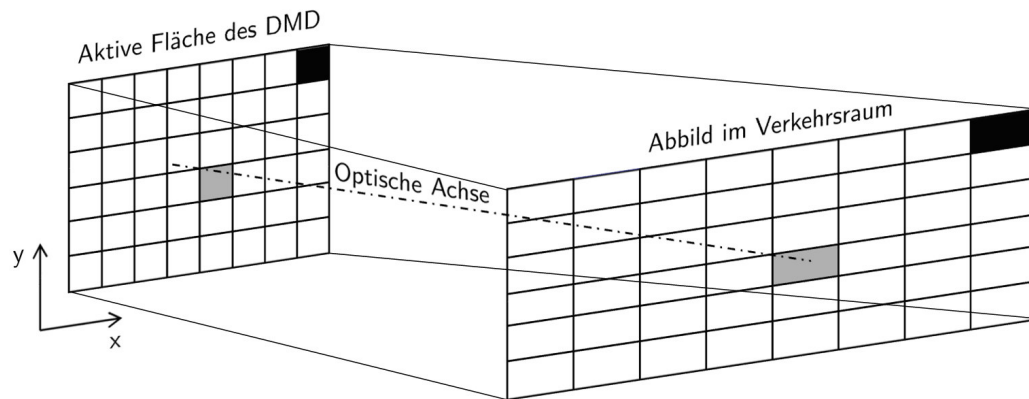


Abbildung 5.16: Anamorphotische Verzeichnung der in den Verkehrsraum abgebildeten aktiven Modulatorfläche

Da bei einer anamorphotischen Verzeichnung lediglich eine Variation des Seitenverhältnisses nicht jedoch der Beleuchtungsstärkeverteilung des homogen beleuchteten DMDs erfolgt, muss in dem gesamten FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ die in HV geforderte Beleuchtungsstärke von 120 lx vorgehalten werden (Tabelle 5.1). Bei einer Fläche von etwa 120 m^2 die von dem FOV aufgespannt wird, lässt sich der dafür erforderliche Lichtstrom in dem FOV mithilfe der Gleichung 2.2 zu 14.400 lm bestimmen. Unter Vernachlässigung von Verlusten an optischen Grenzflächen des Projektionssystems ist somit eine Beleuchtungsstärke von mindestens $9,796 \cdot 10^7 \text{ lx}$ auf der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 zu erreichen.

Unter Verwendung des 2×4 Boost HL LED Arrays als Lichtquelle und einer homogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche, können mit einer anamorphotischen Verzeichnung des Projektionssystems die geforderten 120 lx in HV somit nicht erreicht werden.

Radiale Verzeichnung

Die radiale Verzeichnung lässt sich in radial-symmetrisch und radial-*asymmetrisch* bzw. die *tangentiale* Verzeichnung unterteilen [WINN12]. Die beiden letzteren sind an dieser Stelle nicht Diskussionsgegenstand, da diese unter anderem durch die Dezentrierung optischer Elemente hervorgerufen werden. Bei einer negativen radial-symmetrischen Verzeichnung des Abbilds wird der Abbildungsmaßstab mit zunehmendem Abstand des Objektpunktes zur optischen Achse kleiner. Umgekehrt wird, wie in Abbildung 5.17 dargestellt, bei einer positiven radial-symmetrischen Verzeichnung der Abbildungsmaßstab mit zunehmendem Abstand des Objektpunktes zur optischen Achse größer. Verdeutlicht wird dies durch das geschwärzte Kästchen im Eckbereich des verzeichneten Abbilds in Abbildung 5.17.

WOLF ET AL. [WOLF17b] und KNÖCHELMANN ET AL. [KNÖC18] diskutieren die radiale Verzeichnung als Ansatz, um gezielt eine Variation der Beleuchtungsstärke und Pixelgröße im Verkehrsraum zu erzeugen. Für die Projektion von Symbolen ist in der Mitte der Lichtverteilung

eine hohe Auflösung und Abbildungsschärfe erforderlich, die zum Randbereich hin abnehmen können. Analog gilt für die Beleuchtungsstärke in der Lichtverteilung, dass diese im Zentrum hoch sein muss und zu den Randbereichen abnimmt (vgl. Abschnitt 2.3.1).

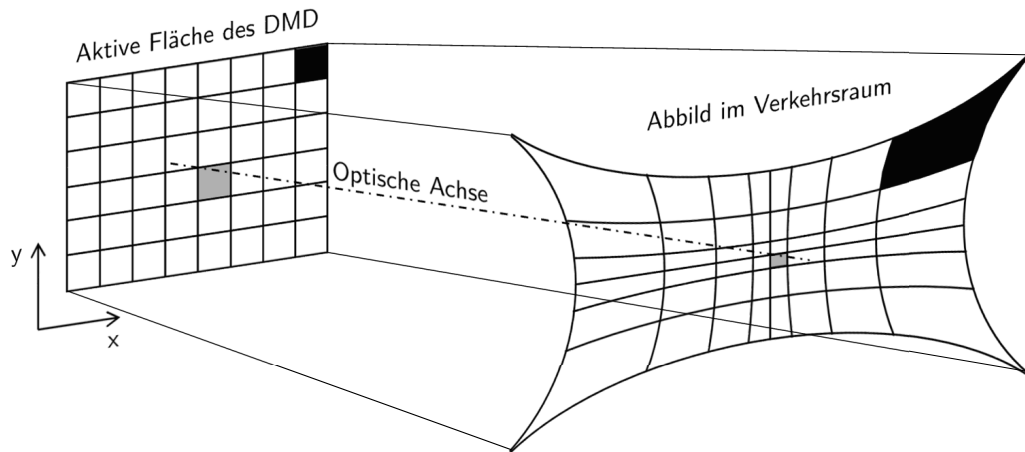


Abbildung 5.17: Positiv radial-symmetrische Verzeichnung der in den Verkehrsraum abgebildeten aktiven Modulatorfläche

Anders als bei der anamorphotischen Verzeichnung kann jedoch nicht der gesamte Lichtstrom innerhalb der radial verzeichneten Lichtverteilung zur vollständigen Ausleuchtung des FOV genutzt werden (vgl. Abbildung 5.18). Da jedoch mit einer anamorphotischen Verzeichnung des Projektionssystems die lichttechnischen Anforderungen nicht erfüllt werden können, wird für die weitere Konzipierung des DMD-Scheinwerfers eine auf die homogene Beleuchtungsstrategie abgestimmte radiale Verzeichnung gewählt.

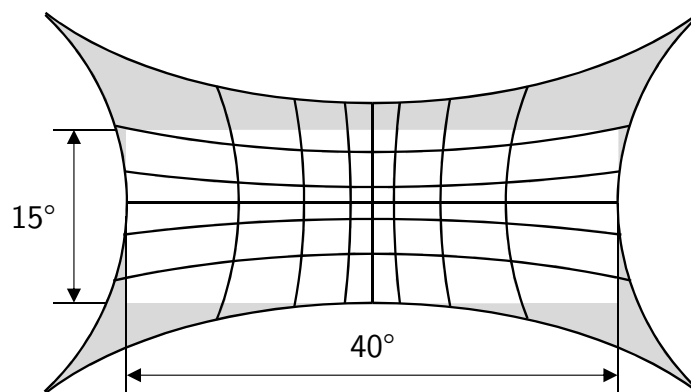


Abbildung 5.18: Nutzbarer Lichtstromanteil (weiß hinterlegt) der radialen Verzeichnung

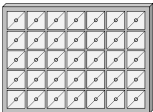
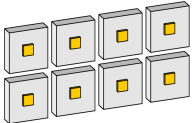
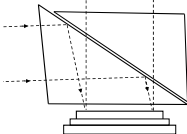

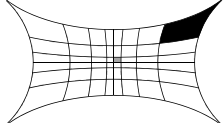
An diesem Beispiel wird deutlich, dass die Strategie zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche und die Verzeichnung des Projektionssystems eng miteinander verknüpft sind. Wird eine inhomogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche als Beleuchtungsstrategie gewählt, so ist in Kombination mit einer anamorphotischen Verzeichnung des Projektionssystems die Erfüllung der lichttechnischen Anforderungen möglich.

5.7 Lichtstrom- und Étenduefaktor ermitteln sowie Strahlenmodell erstellen

Entsprechend der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme ist für das gewählte Konzept, welches noch einmal in Tabelle 5.10 zusammengefasst ist, der Lichtstrom- und Étenduefaktor zu ermitteln. Grund hierfür ist, dass jeder Konzipierungsschritt eine Abweichung der anfänglichen Annahmen aus Abschnitt 5.2.3 herbeiführen kann. Der Lichtstromfaktor L_F wird durch den Quotienten von Ist- und Soll-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche gebildet und zur Überprüfung hinsichtlich des geforderten Lichtstroms von 1.400 lm in dem FOV verwendet. Der Étenduefaktor E_F , welcher aus dem Quotienten der Étendue der Lichtquelle und der Étendue des Lichtmodulators gebildet wird, dient als Indikator für die Systemeffizienz.

Für das gewählte Konzept werden im Rahmen der Konzipierungsschritte "Systemarchitektur determinieren" und "Verzeichnung abstimmen" Änderungen hinsichtlich der anfänglichen Annahmen durchgeführt. Um das Konzept sowohl im Hinblick auf die anfänglichen Annahmen als auch die Änderungen im Rahmen der Konzipierung abzusichern, werden im Folgenden der Lichtstrom- und Étenduefaktor zur Bewertung ermittelt.

Tabelle 5.10: Ausgewähltes Konzept für den Entwurf des DMD-Scheinwerfers

Licht-modulator	Licht-erzeugung	System-architektur	Beleuchtungs-strategie	Verzeichnung
0,7" DMD	2x4 Boost HL LED-Array	telezentrisch mit TIR-Prisma	nichtabbildend homogen	radial
				

Im Konzipierungsschritt "Systemarchitektur determinieren" wird eine telezentrische Systemarchitektur unter Verwendung eines TIR-Prismas zur Umsetzung des DMD-Scheinwerfers gewählt. Somit ist zusätzlich zu der Annahme, dass ein Dreilinsensystem mit einem Wirkungsgrad von 88,5% zur Beleuchtung des DMDs eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 5.2.3) der Wirkungsgrad des TIR-Prismas zu berücksichtigen, da an den Grenzflächen des TIR-Prismas weitere Lichtstromverluste auftreten (vgl. Abschnitt 5.4.1).

Im Konzipierungsschritt "Verzeichnung abstimmen" wird für die inhomogene Ausleuchtung des Verkehrsraums eine radiale Verzeichnung für das Projektionssystem abgestimmt. Wie bereits in Abschnitt 5.6 gezeigt, wird nicht der gesamte Lichtstrom innerhalb der radial verzeichneten Lichtverteilung zur Ausleuchtung des FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ genutzt, sodass weitere Lichtstromverluste berücksichtigt werden müssen.

Lichtstromfaktor

Für die Erfüllung des geforderten Lichtstroms von 1.400 lm in einem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ ist ein Lichtstromfaktor von $L_F \approx 1$ oder $L_F > 1$ erforderlich. Ist der Lichtstromfaktor deutlich kleiner als eins ($L_F < 1$) kann der geforderte Lichtstrom in dem FOV nicht erreicht werden (vgl. Abschnitt 4.1). Für diesen Fall werden in der Methode zum Konzipieren Schleifen zu den Konzipierungsschritten "Lichtmodulator festlegen" und "Lichterzeugung spezifizieren" vorgehalten, damit Anpassungen zur Erreichung von $L_F \approx 1$ bzw. $L_F > 1$ vorgenommen werden können.

Bei der Berechnung des Soll-Lichtstroms auf der aktiven Modulatorfläche wird für das optische System zur Projektion in den Verkehrsraum weiterhin von einem Dreilinsensystem mit einem Wirkungsgrad von 88,5 % ausgegangen. Der Wirkungsgrad des DMDs, von dem das Licht in das Projektionssystem reflektiert wird, ist mit 68 % unverändert [TEXA19c]. An den Grenzflächen des zwischen DMD und Projektionssystem angeordneten TIR-Prismas werden Lichtstromverluste von je 2 % pro Grenzfläche veranschlagt (vgl. Abschnitts 5.4.1), welches bei vier Grenzflächen zusätzliche Verluste in Höhe von 7,8 % bedeuten. Darüber hinaus wird weiterhin von einer Überbeleuchtung der aktiven Modulaotrfläche ausgegangen, sodass der nutzbare Lichtstromanteil um 16 % reduziert wird (vgl. Abschnitt 5.2.3). Der nutzbare Lichtstromanteil der radial verzeichneten Lichtverteilung in dem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ wird mit 85 % angenommen. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Wirkungsgrade und Verluste ergibt sich der Soll-Lichtstrom auf der aktiven Moduzlatorfläche somit zu

$$\Phi_{\text{Soll}} = \frac{1.400 \text{ lm}}{0,885 \cdot 0,68 \cdot 0,922 \cdot 0,84 \cdot 0,85} = 3.534 \text{ lm} . \quad (5.13)$$

Der Ist-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche wird mithilfe des nutzbaren Lichtstromanteils des 2×4 Oslon[®] Boost HL LED Array ermittelt. Wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, ergibt sich dieser auf Grundlage von G_{DLP7000} zu 4.801 lm. Für das optische System zur Beleuchtung der aktiven Modulaotrfläche wird wie zuvor in Abschnitt 5.2.3 von einem Dreilinsensystem mit einem Wirkungsgrad von 88,5 % ausgegangen. Lichtstromverluste von je 2 % werden an zwei Grenzflächen des TIR-Prismas zur Beleuchtung des DMDs veranschlagt, sodass zusätzliche Verluste in Höhe von 4 % auftreten. Der Ist-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 ergibt sich entsprechend der Gleichung 5.14 zu

$$\Phi_{\text{Ist}} = 4.801 \text{ lm} \cdot 0,885 \cdot 0,96 = 4.079 \text{ lm} . \quad (5.14)$$

Der Lichtstromfaktor als Quotient von Φ_{Ist} und Φ_{Soll} ist somit

$$L_F = \frac{\Phi_{\text{Ist}}}{\Phi_{\text{Soll}}} = 1,15 \quad (5.15)$$

und erfüllt damit das Kriterium $L_F > 1$.

Étenduefaktor

Bei einem Étenduefaktor von $E_F \approx 1$ ist das konzipierte Lichtsystem durch eine hohe Effizienz gekennzeichnet. Ineffiziente Systeme hingegen werden durch einen Étenduefaktor deutlich größer bzw. kleiner als 1 ($E_F > 1$ bzw. $E_F < 1$) ausgewiesen. Für diese Fälle sind in der Methode zum Konzipieren Schleifen zu den Konzipierungsschritten "Lichtmodulator festlegen" und "Lichterzeugung spezifizieren" vorgesehen, um $E_F \approx 1$ durch Anpassungen zu erreichen.

Für das 2×4 Boost HL LED-Array als Lichtquelle lässt sich die Étendue unter Berücksichtigung der LED-Anzahl (8), der LED-Emissionsfläche ($1,03 \times 1,03 \text{ mm}^2$) sowie dem Emissionswinkel ($\pm 60^\circ$) unter Zuhilfenahme der Gleichung 2.7 zu

$$G_{\text{Boost-Array}} = 8 \cdot \pi \cdot (1,03 \cdot 1,03) \text{ mm}^2 \cdot \sin^2(60^\circ) = 19,99 \text{ mm}^2\text{sr} \quad (5.16)$$

bestimmen.

Die Étendue des DLP7000 ergibt sich unter Berücksichtigung der telezentrischen Systemarchitektur wie in Abschnitt 5.2.3 berechnet zu

$$G_{\text{DLP7000}} = 18,26 \text{ mm}^2\text{sr} . \quad (5.17)$$

Wird im Rahmen der Konzipierung anstelle der telezentrischen eine nicht-telezentrische Systemarchitektur gewählt, so ist an dieser Stelle die Étendue des DMDs in Abhängigkeit der Winkelerhöhung zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche, welche für eine ausreichende Trennung der Strahlengänge von Beleuchtungs- und Projektionssystem erforderlich ist, zu berechnen (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Die Division von $G_{\text{Boost-Array}}$ durch G_{DLP7000} ergibt einen Étenduefaktor von

$$E_F = \frac{G_{\text{Boost-Array}}}{G_{\text{DLP7000}}} = 1,095 . \quad (5.18)$$

Da sowohl der Lichtstromfaktor mit $L_F > 1$ als auch der Étenduefaktor mit $E_F \approx 1$ entsprechend der Methode zum Konzipieren erfüllt werden, wird im Folgenden mit dem letzten Schritt der Methode "Strahlenmodell erstellen" fortgefahren.

Strahlenmodell erstellen

Als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf des konzipierten DMD-Scheinwerfers wird der Strahlengang von dem 2×4 LED-Array bis in den Verkehrsraum, welcher auf Grund der Größe in Abbildung 5.19 nicht dargestellt ist, mithilfe der paraxialen Optik ausgearbeitet. Weiterhin lassen sich mithilfe des Strahlenmodells kritische Systemkonfigurationen, welche unter anderem durch die Kollision einzelner optischer Elemente zur Strahlformung und -ablenkung bzw. des Beleuchtungs- und Projektionssystems hervorgerufen werden können, identifizieren.

Über ein Dreilinsensystem wird das von dem 2×4 Osram Oslon[®] Boost HL LED-Array emittierte Licht zunächst auf das TIR-Prisma geformt und an der Grenzfläche der beiden Prismenhälften auf die aktive Modulatorfläche des DLP7000 totalreflektiert. In Abhängigkeit der Mikrospiegelstellung wird das Licht, wie in Abbildung 5.19 dargestellt, in das Dreilinsensystem zur verzeichnenden Projektion in den Verkehrsraum oder auf einen Absorber (nicht dargestellt) reflektiert.

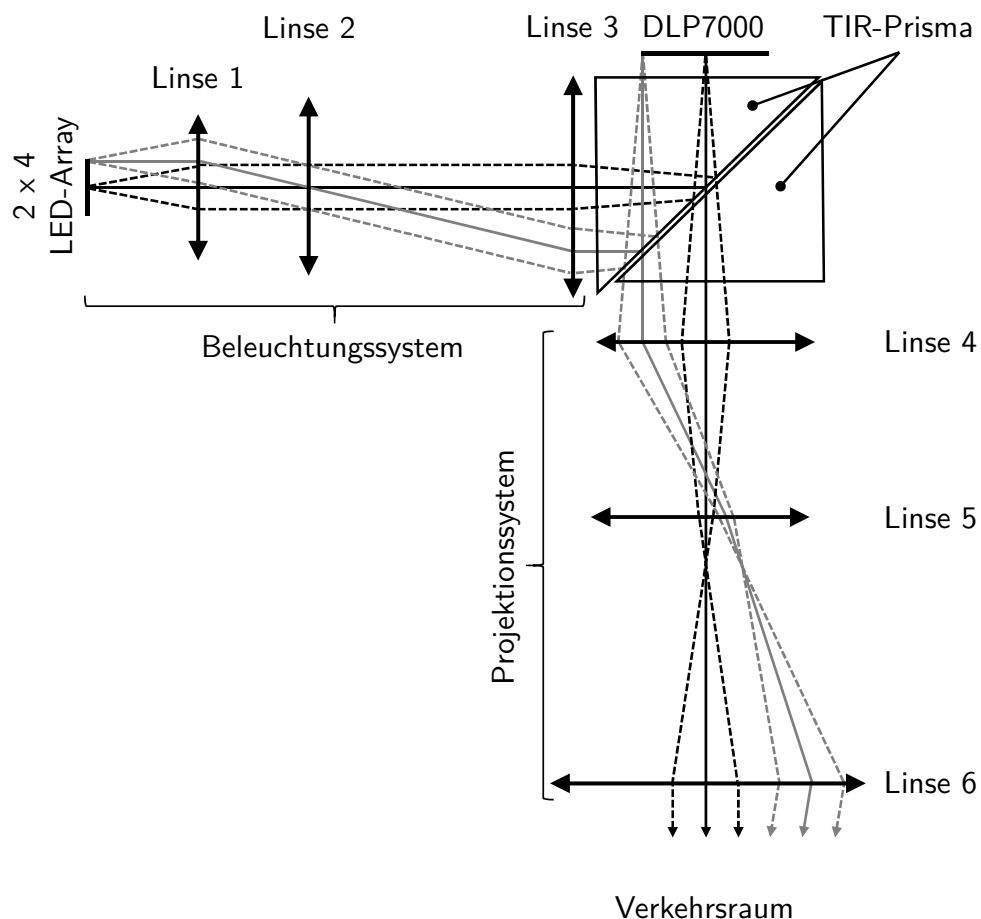


Abbildung 5.19: Strahlenmodell des konzipierten DMD-Scheinwerfers

Da bei dem konzipierten System keine kritische Konfiguration vorliegt, wird im folgenden Kapitel mit dem Entwurf des DMD-Scheinwerfers fortgefahren.

6 Entwerfen eines DMD-Scheinwerfers

In diesem Kapitel wird der konzipierte DMD-Scheinwerfer mithilfe der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung unter Verwendung der Simulationssoftware Zemax OpticStudio[®] entworfen. Das Kapitel ist dabei entsprechend der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme aus Abschnitt 4.2 gegliedert. Als Grundlage für den Entwurf wird das in Abschnitt 5.7 erarbeitete Strahlenmodell verwendet.

Der Entwurf des Beleuchtungs- und Projektionssystems von dem DMD-Scheinwerfer erfolgt aufgrund der gewählten telezentrischen Systemarchitektur unabhängig voneinander (vgl. Abschnitt 5.4). In Abschnitt 6.1 erfolgt zunächst der sequentielle Entwurf des optischen Systems zur homogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000. Die einzelnen Entwurfsschritte der Methode werden exemplarisch für die Linse einer einzelnen LED (LED-Optik) des 2x4 Oslon[®] HL LED-Arrays durchgeführt. Durch Vervielfältigung der LED und LED-Optik im Rahmen der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung wird die Emissionscharakteristik und -fläche des Linsenarrays analysiert und als Grundlage für den Entwurf der weiteren optischen Elemente des Beleuchtungssystems verwendet.

Wie in Abschnitt 5.6 beschrieben, wird zur Projektion in den Verkehrsraum ein optisches System mit radialer Verzeichnung eingesetzt. Das am IPeG entwickelte Projektionssystem wird in Abschnitt 6.1.4 hinsichtlich der Abbildungsqualität bewertet.

In Abschnitt 6.2 wird im Rahmen des nicht-sequentiellen Entwurfs zunächst das optische System zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 aufgebaut. Im Detail wird dabei auf die Modellierung und homogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 eingegangen. Anschließend erfolgt der Aufbau des vollständigen nicht-sequentiellen Entwurfs des DMD-Scheinwerfers und eine Wirkungsgradbewertung der einzelnen optischen Elemente sowie für verschiedene Lichtverteilungen.

Mithilfe der Methoden zum Konzipieren und Entwerfen werden in Abschnitt 6.3 zunächst Maßnahmen zur Optimierung des DMD-Scheinwerfers diskutiert und anschließend eine geeignete Maßnahme durchgeführt.

6.1 Sequentieller Entwurf

Für die nichtabbildende homogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche ist bei der Verwendung gleicher LEDs zur Umsetzung eines LED-Arrays als Lichtquelle ebenfalls der Einsatz identischer LED-Optiken möglich. Der wesentliche Vorteil dieses Ansatzes ist, dass der sequentielle Entwurf der LED-Optik lediglich für eine einzelne LED durchgeführt werden kann. Im weiteren Verlauf des Entwurfsprozesses lässt sich durch Vervielfältigung der LED und des sequentiellen Entwurfs der LED-Optik das LED-Array und Linsenarray im Rahmen des nicht-sequentiellen Optikentwurfs umsetzen.

Im Folgenden werden für diesen Ansatz die einzelnen Entwurfsschritte entsprechend der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme durchgeführt. Angefangen mit der Definition der Emissionscharakteristik und -fläche der Osram Oslon® Boost HL LED in Abschnitt 6.1.1, erfolgt anschließend (Abschnitt 6.1.2) die Festlegung von Funktionsflächen, Parametern und Randbedingungen sowie die Erstellung einer *Merit Function* für den sequentiellen Entwurf der LED-Optik. In Abschnitt 6.1.3 wird neben dem optimierten Entwurf der LED-Optik auch der optimierte Entwurf der weiteren optischen Elemente des Beleuchtungssystems vorgestellt.

6.1.1 Emissionscharakteristik und -fläche definieren

Für den sequentiellen Entwurf der LED-Optik ist zunächst die Systemapertur, welche die objektseitige Öffnungsweite des optischen Elements begrenzt, zu spezifizieren. Dies kann zum einen über den Durchmesser der Eintrittspupille oder der numerischen Apertur, aber auch über den zu berücksichtigenden Emissionswinkel der Lichtquelle erfolgen. Auf Basis der Berechnungen für das LED-Array in Abschnitt 5.3.2 wird die Systemapertur über den zu berücksichtigenden Emissionswinkel der LED mit $\pm 60^\circ$ spezifiziert.

Die räumliche Ausbreitung der emittierten Strahlen und die Größe der Emissionsfläche wird durch die Anordnung sogenannter *Fields*, welche die Emissionscharakteristik der LED auf einzelne Punkte reduziert, festgelegt. Für den Entwurf eines rotationssymmetrischen optischen Elements zur Strahlformung werden unter Berücksichtigung der 1 mm^2 großen Emissionsfläche der Osram Oslon® Boost HL LED drei *Fields* entsprechend der Abbildung 6.1 platziert. *Field 1* wird dabei in der Mitte der Emissionsfläche und *Field 2* bzw. *Field 3* um je $0,25 \text{ mm}$ in x - und y -Richtung versetzt zum vorherigen *Field* angeordnet.

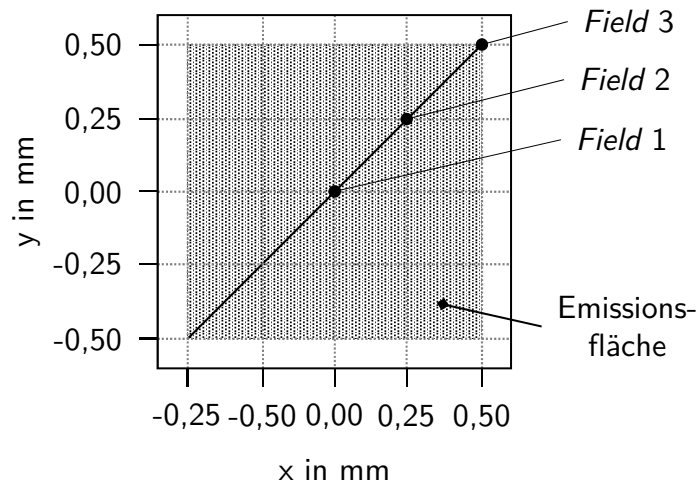


Abbildung 6.1: Anordnung der *Fields* für den sequentiellen Entwurf der LED-Optik

Weiterhin erfolgt in diesem Entwurfsschritt das Festlegen des Emissionsspektrums der leuchtstoffbasierten LED, welches dem Datenblatt [OSRA20d] entnommen wird. Die dominante Wellenlänge der blauen LED zur Anregung des Leuchtstoffs wird mit 442 nm und die emittierte Wellenlänge des angeregten Leuchtstoffs mit 555 nm festgelegt.

6.1.2 Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen sowie *Merit Function* erstellen

Funktionsflächen und Parameter

Definiert über zwei Funktionsflächen wird die optische Wirkung von Linsen durch die Geometrie der Funktionsflächen sowie dem Brechungsindex des Linsenmaterials bestimmt (Abschnitt 2.1.5). Als veränderliche Parameter der Funktionsflächen, die im Rahmen der Optimierung variiert werden dürfen, werden die Funktionsflächenradien und -abstände (entspricht der Linsendicke) sowie die Konizität der Funktionsflächen festgelegt. Das Linsenmaterial wird entsprechend der Anforderungsliste (vgl. Tabelle 5.1) als PMMA mit einem Brechungsindex von 1,49 festgelegt.

Randbedingungen

Mit dem Ziel eine kompakte LED-Optik zu entwerfen, wird als Randbedingung für die Optimierung der Abstand zwischen der LED-Emissionsfläche und der ersten Linsenfunktionsfläche auf 1 mm (vgl. Tabelle 5.1) festgelegt. Hintergrund ist, dass mit zunehmendem Abstand zwischen Emissionsfläche und erster Linsenfunktionsfläche bei gleichbleibendem Akzeptanzwinkel der Linse der Funktionsflächendurchmesser zunimmt [LEY18a]. Je kleiner der Durchmesser, desto kompakter können die LEDs innerhalb des LED-Arrays angeordnet werden, welches vorteilhaft für die Beleuchtung der kleinen aktiven Modulatorfläche ist.

Merit Function

Als einzuhaltendes Entwurfsziel wird in der *Merit Function* der Abstand zwischen der ersten und zweiten Funktionsfläche der Linse (entspricht der Linsendicke) auf mindestens 1 mm und maximal 15 mm begrenzt. Weiterhin wird der Durchmesser der Funktionsflächen auf maximal 15 mm beschränkt. Die Begrenzung auf einen Mindestwert ist nicht erforderlich, da sich dieser automatisch aus der Diagonalen der LED-Emissionsfläche und ihrem Abstand zur ersten Linsenfunktionsfläche sowie dem zu berücksichtigenden Emissionswinkel der LED ergibt [LEY18a]. Damit das von der LED emittierte Licht von den nachfolgenden optischen Elementen des Beleuchtungssystems effektiv zur weiteren Formung auf die aktive Modulatorfläche genutzt werden kann, ist es zielführend mithilfe der LED-Optik aus dem divergierenden Strahlverlauf ein konvergierender Strahlverlauf zu erzeugen. Hierfür wird in der *Merit Function* als zu erreichendes Entwurfsziel der bildseitige Winkel relativ zur optischen Achse (z-Achse) für die Strahlen der drei *Fields* auf 0° festgelegt.

6.1.3 Sequentiellen Entwurf optimieren

Für die Optimierung der LED-Optik sowie den weiteren optischen Elementen des Beleuchtungssystems werden nachfolgend die Optimierungsart und der Optimierungsalgorithmus definiert. In der frühen Phase der Entwurfsoptimierung erfolgt für den Erhalt einer ersten Näherung eine „globale“ Optimierung (vgl. Abschnitt 4.2). Für eine effektive Verbesserung dieser ersten Näherung wird anschließend „lokal“ weiter optimiert bis hin zu den finalen Entwürfen in Abbildung 6.2 bzw. Abbildung 6.3. Speziell zum Entwerfen optischer Systeme entwickelt, wird als Optimierungsalgorithmus *Damped Least Squares* verwendet (vgl. Abschnitt 4.2).

Sequentieller Entwurf der LED-Optik

Auf Grundlage der zuvor erläuterten Schritte zum Entwerfen der LED-Optik wird im Rahmen der Optimierung der in Abbildung 6.2 dargestellte Entwurf erzeugt. Strahlen der Wellenlänge 442 nm sind in der Abbildung blau und Strahlen der Wellenlänge 555 nm in grün dargestellt.

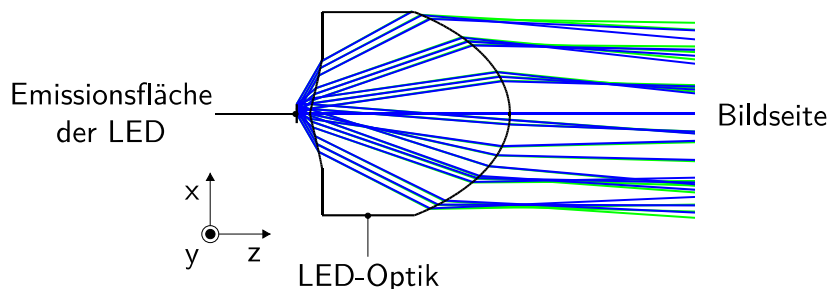


Abbildung 6.2: Sequentieller Entwurf der LED-Optik

Da im Rahmen der sequentiellen Strahlverfolgung die objektseitigen *Field*-Strahlen durch eine feststehende Funktionsflächenreihenfolge verfolgt werden, bei der jeder Strahl nur einmal mit jeder Fläche interagiert (vgl. Abschnitt 2.2.1), lässt sich ein sequentieller Entwurf des vollständigen LED-Arrays und Linsenarrays nicht realisieren. Damit die weiteren Elemente des optischen Systems zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 entworfen werden können, ist daher eine neue Emissionscharakteristik und -fläche zu definieren. Hierfür ist zunächst das LED-Array und Linsenarray durch Vervielfältigung der Boost HL LED und LED-Optik im Rahmen der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung aufzubauen. Anschließend wird der nicht-sequentielle Entwurf des LED-Arrays und Linsenarrays im Hinblick auf die Lichtausbreitung (Emissionscharakteristik) und die Dimensionen des Linsenarrays (Emissionsfläche) analysiert. Auf Grundlage dieser Analyse kann für die nachfolgenden optischen Elemente zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche eine neue Emissionscharakteristik und -fläche definiert werden.

Sequentieller Entwurf von Sammellinse, Freiformlinse und TIR-Prismenhälfte

Die Emissionscharakteristik und -fläche des Linsenarrays wird wie in Abbildung 6.3 dargestellt durch die Anordnung von *Fields* beschrieben. Für die Übersichtlichkeit ist lediglich der Verlauf der Hauptstrahlen für die beiden Wellenlängen 442 nm (blau) und 555 nm (grün) dargestellt.

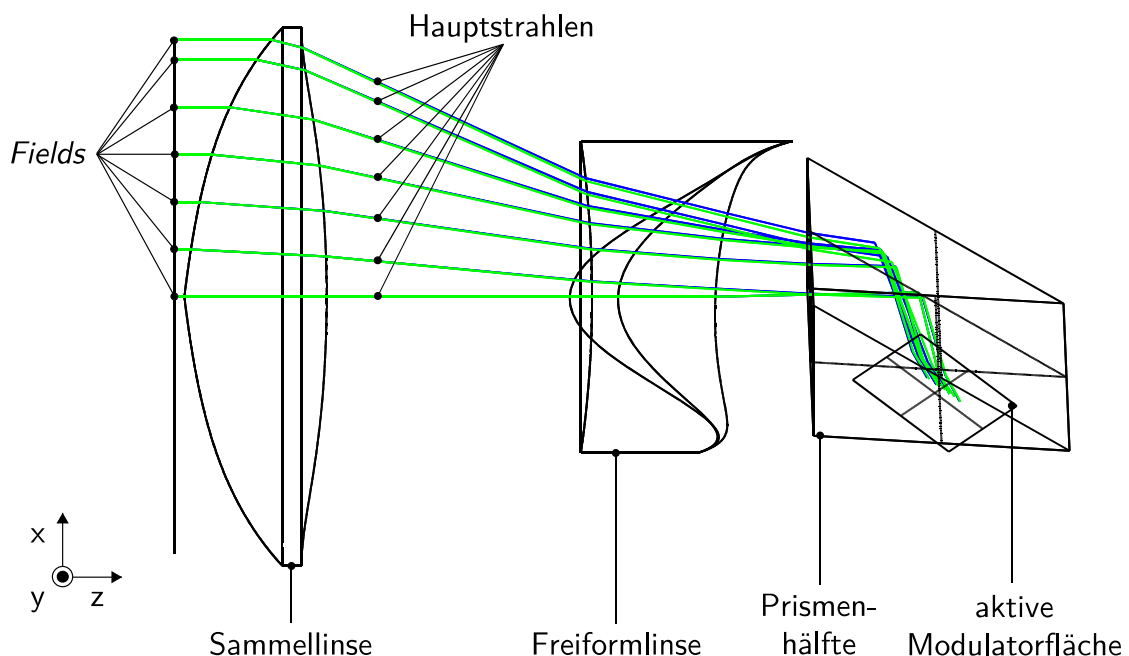


Abbildung 6.3: Sequentieller Entwurf der Sammellinse, Freiformlinse und einer TIR-Prismenhälfte zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000

Unter Verwendung einer Sammellinse wird ein konvergenter Verlauf der Lichtstrahlen erwirkt, welcher im Hinblick auf eine homogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000

mithilfe einer Freiformlinse geformt wird. Zur Ablenkung der Lichtstrahlen auf die aktive Modulatorfläche des DLP7000 wird ein kommerzielles TIR-Prisma der Firma *Young Optics* eingesetzt. Für den sequentiellen Entwurf ist es dabei hinreichend lediglich eine Prismenhälfte zu entwerfen.

Werden die optischen Funktionsflächen der Sammellinse, Freiformlinse und der Prismenhälfte mit einer Antireflexbeschichtung versehen (vgl. Tabelle 5.1), lässt sich der prozentuale Anteil an Lichtstrahlen, die auf die aktive Modulatorfläche des DLP7000 treffen, mithilfe eines sogenannten *Footprint*-Diagramms (Abbildung 6.4) zu 73,94 % bestimmen.

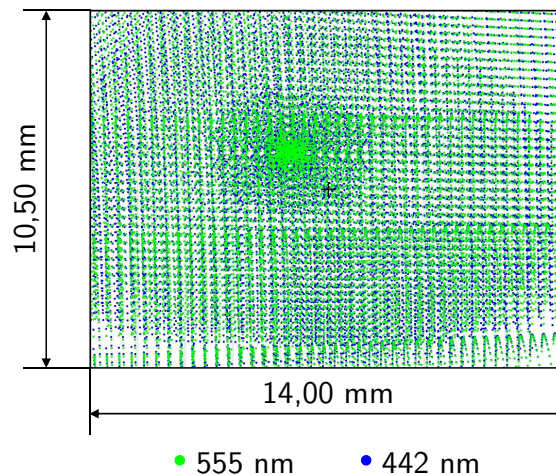


Abbildung 6.4: *Footprint*-Diagramm der aktiven Modulatorfläche des DLP7000

In Abschnitt 5.2.3 wird der Wirkungsgrad einer einzelnen Linse des Beleuchtungssystems mit 96 % und die Verluste infolge einer Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche mit 16 % angenommen. Für den Wirkungsgrad des TIR-Prismas zur Ablenkung der Strahlen auf die aktive Modulatorfläche werden in Abschnitt 5.7 96 % veranschlagt. Aus konzeptioneller Sicht ergibt sich somit der Wirkungsgrad für den in Abbildung 6.3 dargestellten Entwurf zu

$$\eta_{SI_FL_TIR} = 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,84 \cdot 0,96 = 0,7432, \quad (6.1)$$

sodass die Abweichung zwischen Konzept und sequentielltem Entwurf kleiner als 0,5 % ist.

Abgesehen von dem Anteil an Lichtstrahlen auf der aktiven Modulatorfläche lässt sich unter Verwendung des *Footprint*-Diagramms auch die Strahlverteilung beurteilen. Wie in Abbildung 6.4 zu erkennen ist, wird unter Verwendung des optischen Systems eine erhöhte Strahldichte links oberhalb der Mitte in dem *Footprint*-Diagramm erzeugt. Im unteren Bereich des *Footprint*-Diagramms hingegen ist eine geringere Strahldichte zu erkennen, welches mit einer leicht inhomogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche interpretiert werden kann. Allerdings sind für den sequentiellen Entwurf keine Aussagen im Hinblick auf die transportierte

Strahlleistung möglich (vgl. Abschnitt 2.2.1), sodass eine ausführliche Analyse der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche im Rahmen des nicht-sequentiellen Entwurfs (Abschnitt 6.2.1) erfolgt.

Der sequentielle Entwurf des optischen Systems zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 ist mit diesem Entwurfsschritt abgeschlossen. Für abbildende optische Systeme, wie dem am IPeG entworfenen radial verzeichnenden Projektionssystem, wird im nächsten Schritt der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme die Abbildungsqualität bewertet.

6.1.4 Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs bewerten

Der Entwurfsschritt „Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs bewerten“ wird im Folgenden am Beispiel des radial verzeichnenden Projektionssystems zur Abbildung der aktiven Modulatorfläche in den Verkehrsraum durchgeführt. Das am IPeG entworfene System besteht wie in Abbildung 6.5 dargestellt aus drei Linsen.

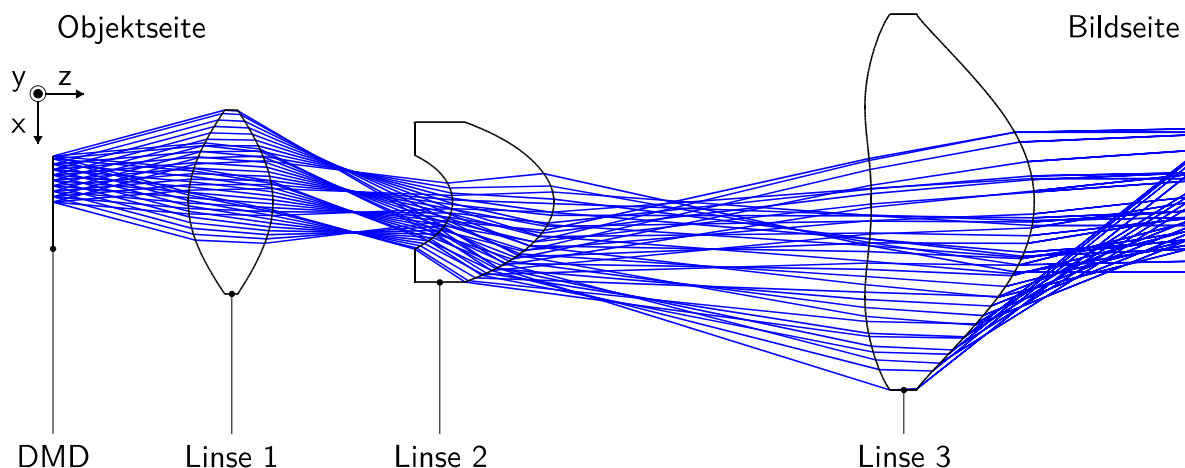


Abbildung 6.5: Sequentieller Entwurf des radial verzeichnenden Projektionssystems

Auf Basis einzelner *Fields*, die zur Beschreibung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 ($14,00 \times 10,5 \text{ mm}^2$) entsprechend der Abbildung 6.6 angeordnet werden, erfolgt zunächst eine Bewertung des toleranzfreien Entwurfs. Anschließend wird unter Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen die Abbildungsqualität des toleranzbehafteten Entwurfs bewertet.

Als Bewertungskriterium wird der RMS-Punktradius verwendet, welcher Informationen über die Form und Größe des von dem optischen System auf der Bildseite abgebildeten Punktes enthält. Bei einem idealen optischen System ist der RMS-Wert des abgebildeten Punktes null. Randbedingungen im Entwurfsprozess wie die Länge des optischen Systems oder die Anzahl optischer Elemente führen jedoch zu Abweichungen von diesem Idealwert (vgl. Abschnitt 6.1.2).

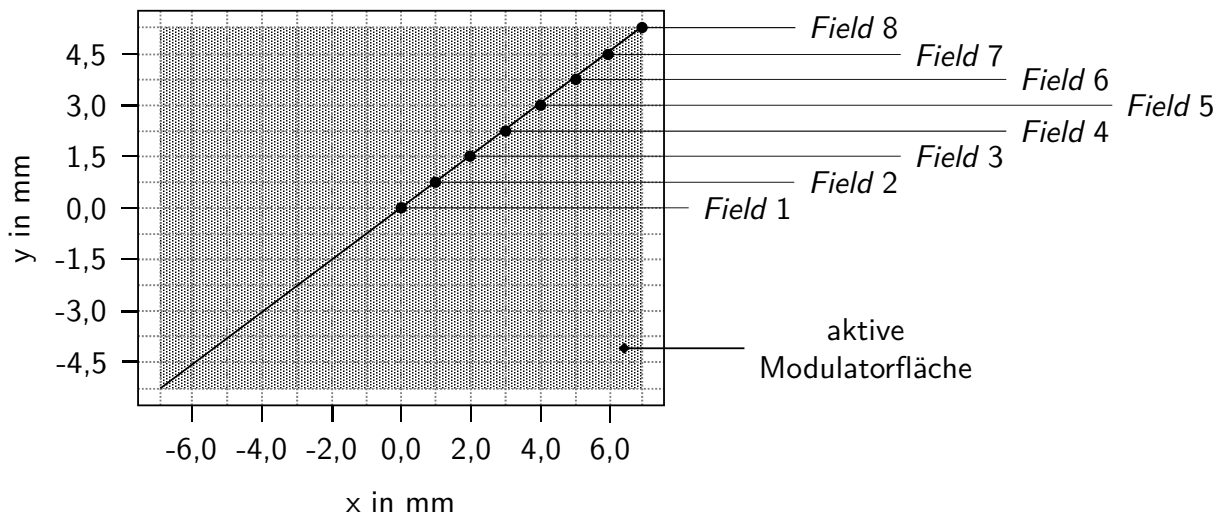


Abbildung 6.6: Anordnung der *Fields* zur Beschreibung der aktiven Modulatorfläche

Eine Optimierung des optischen Systems auf einen RMS-Wert von null ist jedoch häufig nicht sinnvoll, da dies zu hohen Kosten führt. Für das verzeichnende Projektionssystem wird zur Darstellung von Informationen im Verkehrsraum eine ausreichende Schärfe im zentralen Bereich der Lichtverteilung gefordert, die zu den Randbereichen abnehmen kann.

Abbildungsqualität des toleranzfreien Entwurfs

In Abbildung 6.7 sind für die Wellenlängen 442 nm und 555 nm die Werte des RMS-Punktradius in Abhängigkeit der in Abbildung 6.6 angeordneten *Fields* dargestellt. Bei den folgenden Aussagen wird nicht zwischen den RMS-Punktradien in x- bzw. y-Richtung der gleichen Wellenlänge unterschieden, da diese für beide Wellenlängen nahezu gleich sind.

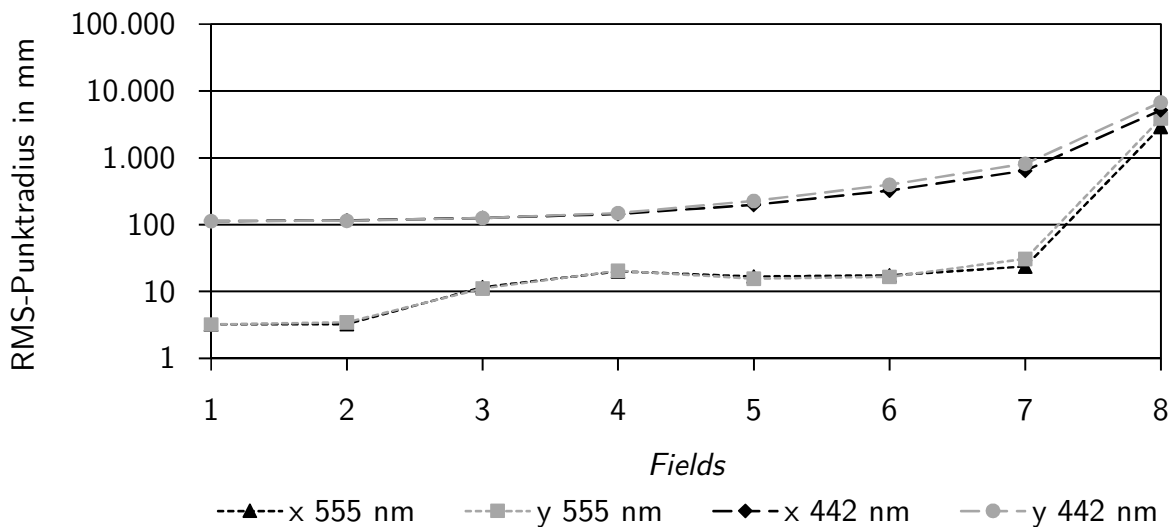


Abbildung 6.7: RMS-Punktradius in Abhängigkeit der *Fields* für den toleranzfreien Optikentwurf auf einem Detektor in 25 m Entfernung

Für beide Wellenlängen wird der RMS-Punktradius mit zunehmendem Abstand von der Mitte der aktiven Modulatorfläche größer. Allerdings ist die Unschärfe bei einer Wellenlänge von 442 nm deutlich höher als bei 555 nm. So ist die Unschärfe von *Field 1*, welches der Mitte der aktiven Modulatorfläche entspricht, für die Wellenlänge 442 nm um etwa 35 mal höher als für die Wellenlänge 555 nm. Diese Diskrepanz wird mit zunehmendem Abstand zur Mitte kleiner, bis die Unschärfe von *Field 8*, welches der Ecke der aktiven Modulatorfläche entspricht, für 442 nm nur noch 1,7 mal höher ist als für 555 nm.

Für beide Wellenlängen ist die Abbildungsqualität des toleranzfreien Optikentwurfs im zentralen Bereich (*Field 1* bis *Field 3*) nicht ausreichend, um in einer Entfernung von 25 m einen einzelnen Mikrospiegel des DLP7000 scharf abzubilden. Für die Projektion von Symbolen wie einem Pfeil, der durch mehrere Mikrospiegel erzeugt wird, ist die Abbildungsqualität jedoch ausreichend.

Abbildungsqualität des toleranzbehafteten Entwurfs

Um den Einfluss fertigungs- und ausrichtungsbedingter Abweichungen auf die Abbildungsqualität des optischen Systems bewerten zu können, ist eine Tolerierung der einzelnen Funktionsflächen hinsichtlich ihrer Oberfläche und Lage erforderlich. Die Tolerierung ist entsprechend dem gewählten Fertigungsverfahren (Ultrapräzisionsdrehen, CNC-Bearbeitung, etc.) durchzuführen (vgl. Abschnitt 4.2). Sind für das Fertigungsverfahren keine Toleranzangaben vorhanden, können zulässige Abweichungen der DIN 10110 Teil 11 [DIN10110-11] entnommen werden. Noch präziserer ist jedoch die Fertigung der einzelnen Linsen und anschließende Vermessung der optischen Funktionsflächen mithilfe taktiler oder optischer Prüftechnik.

Letzteres wird in dieser Arbeit zur Bewertung der Abbildungsqualität des toleranzbehafteten sequentiellen Entwurfs durchgeführt. Hierfür werden die einzelnen Linsen zunächst am IPeG mithilfe einer CNC-Fräse (imes-core Premium 4030 μ) gefertigt und anschließend berührungslos mittels Interferometrie 3D-formvermessen. Die Messgenauigkeit des verwendeten Systems LupoScan der Firma Taylor Hobson[®] beträgt ± 50 nm.

Für den toleranzbehafteten Entwurf ist der RMS-Punktradius in Abhängigkeit der *Fields* in Abbildung 6.8 dargestellt. Grundsätzlich ist die Unschärfe der RMS-Punktradien für beide Wellenlängen beim toleranzbehafteten Optikentwurf höher als bei dem Toleranzfreien. Allerdings ist die Zunahme der Unschärfe für die Wellenlänge 442 nm deutlich höher als für 555 nm. Für *Field 1* und *Field 2* ist die Unschärfe 26 mal höher als bei dem toleranzfreien Optikentwurf, nimmt aber mit zunehmendem Abstand von der Mitte der aktiven Modulatorfläche auf den Faktor 2 ab. Auffällig ist, dass für *Field 8* keine Daten der RMS-Punktradien (x- und

y-Richtung) vorliegen. Dies ist darin begründet, dass die Strahlen von *Field 8* für diese Wellenlänge nicht mehr auf die letzte Linse des Dreilinsensystems treffen und von dieser geformt werden.

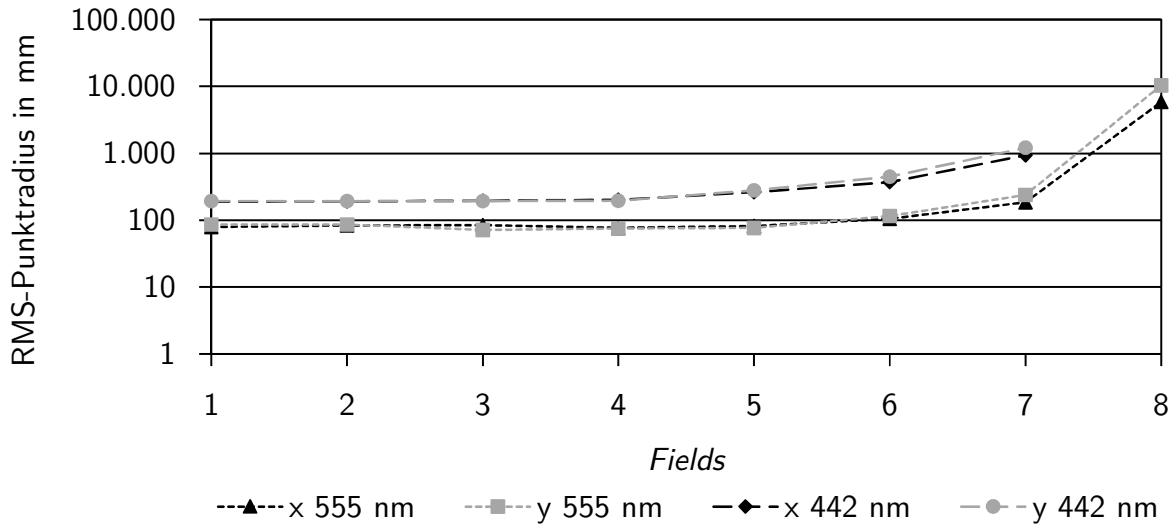


Abbildung 6.8: RMS-Punktradius in Abhängigkeit der *Fields* des toleranzbehafteten Optikentwurfs auf einem Detektor in 25 m Entfernung

Hauptursache für die begrenzte Abbildungsqualität des Projektionssystems ist der Einsatz eines einzelnen Linsenmaterials (PMMA) für alle drei Linsen des Projektionssystems. Durch den Einsatz eines weiteren Linsenmaterials beispielsweise N-BK7 lässt sich die Abbildungsqualität verbessern, welches jedoch nicht Ziel dieser Arbeit ist.

Mit der Bewertung der Abbildungsqualität für das Projektionssystem ist der sequentielle Entwurf des DMD-Scheinwerfers abgeschlossen, sodass im Folgenden mit dem nicht-sequentuellen Entwurf des DMD-Scheinwerfers fortgefahren wird.

6.2 Nicht-sequentieller Entwurf

Im Rahmen des nicht-sequentiellen Entwurfs wird in Abschnitt 6.2.1 zunächst das 2x4 Osram Oslon[®] Boost HL LED-Array und das in Abschnitt 6.1 entworfene Beleuchtungssystem aufgebaut. Um möglichst realitätsnah die Projektion von Lichtverteilungen und Symbolen abbilden zu können, erfolgt darüber hinaus die Modellierung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000 unter Verwendung einzelner Mikrospiegel. Im Hinblick auf die Anforderung, dass für eine Fernlichtverteilung ein Lichtstrom von 1.400 lm in einem FOV von 40°x15° erzeugt werden soll (vgl. Tabelle 5.1), erfolgt eine Analyse der aktiven Modulatorfläche hinsichtlich des Ist- und Soll-Lichtstroms. Gleichzeitig wird die Strategie zur nichtabbildenden homogenen Beleuchtung sowie die Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche untersucht (vgl. Abschnitt 5.7).

In Abschnitt 6.2.2 wird zuerst für die einzelnen optischen Elemente des nicht-sequentiellen Entwurfs eine Wirkungsgradbewertung durchgeführt. Danach erfolgt in Bezug auf die Anforderungen (vgl. Tabelle 5.1) die Wirkungsgradbewertung von Abblend- und Fernlichtverteilungen mit und ohne Symbolprojektion.

Durch eine Optimierungsschleife in Abschnitt 6.3 werden auf Basis der ermittelten Wirkungsgrade (optische Elemente und Lichtverteilungen) Maßnahmen zur Erhöhung des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke in HV diskutiert und anschließend durchgeführt.

6.2.1 Lichtquelle und nicht-sequentiellen Entwurf aufbauen

Entsprechend der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme wird im Folgenden auf Grundlage des in Abschnitt 5.3.2 erarbeiteten Lichtquellenkonzepts das 2x4 LED-Array unter Verwendung der Oslon[®] Boost HL LED aufgebaut. Die LED wird dabei in Zemax OpticStudio[®] modelliert, da zum Entwurfszeitpunkt noch keine Strahldatei vom Hersteller zur Verfügung stand. Als Lambertstrahler ausgeführt, wird die Lichtstärkeverteilung der Oslon[®] Boost HL LED mithilfe des Lambert'schen Kosinussatzes (Gleichung 2.14) modelliert [OSRA20d]. Der LED-Lichtstrom wird für eine Sperrschichttemperatur von 70 °C (vgl. Tabelle 5.1) dem Datenblatt entnommen und auf 877 lm festgelegt. Weiterhin werden der LED 15 · 10⁶ Strahlen zugewiesen. Durch Vervielfältigung der modellierten LED erfolgt der Aufbau des 2x4 LED-Array.

Für das optische System zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche werden aus den Funktionsflächen des sequentiellen Entwurfs optische Volumenelemente generiert. Analog zur modellierten Oslon[®] Boost HL LED wird durch Vervielfältigung der LED-Optik aus Abschnitt 6.1.3 ein Linsenarray aufgebaut und in einem Abstand von 1 mm zu den Emissionsflächen der acht

LEDs (vgl. Tabelle 5.1) positioniert. Nachfolgend zum Linsenarray erfolgt die Positionierung der Sammellinse, Freiformlinse und des vollständigen TIR-Prismas aus Abschnitt 6.1.3. Die optischen Funktionsflächen der Linsen und des TIR-Prismas werden entsprechend der Anforderungsliste (vgl. Tabelle 5.1) mit einer Antireflexbeschichtung versehen. Vervollständigt wird der nicht-sequentielle Entwurf des Beleuchtungssystems durch die Modellierung der aktiven Modulatorfläche des DLP7000, sodass sich der in Abbildung 6.9 dargestellte Aufbau ergibt.

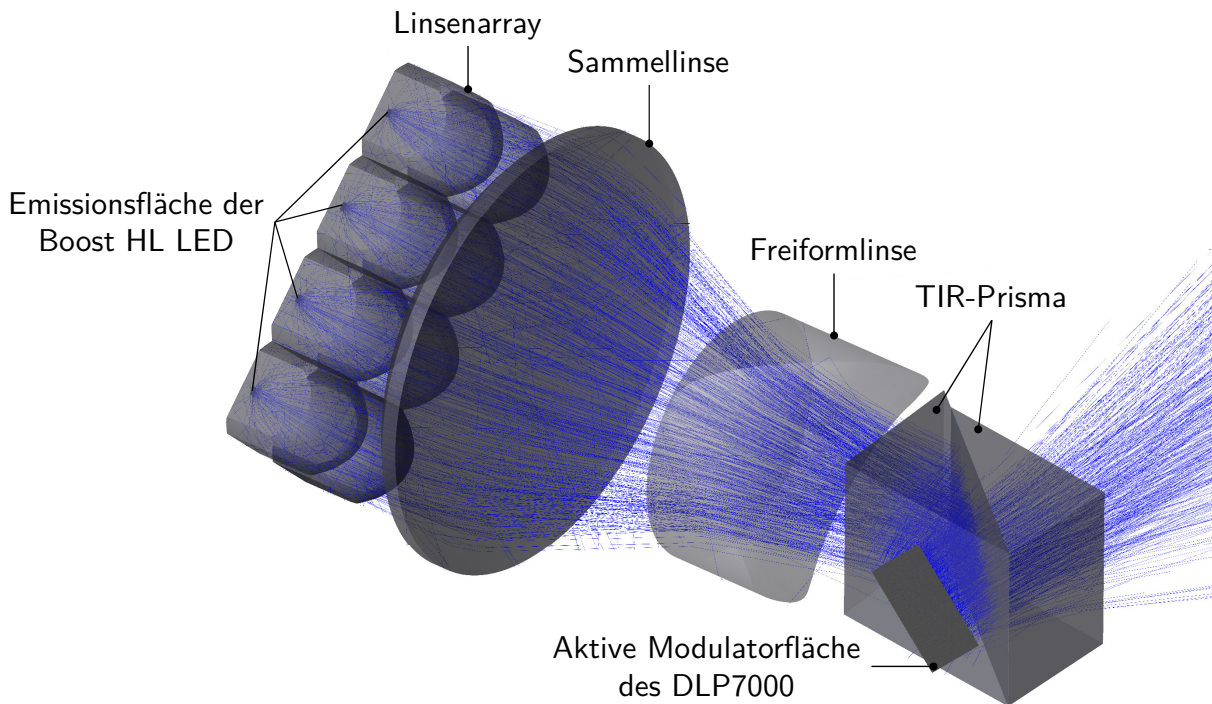


Abbildung 6.9: Nicht-sequentieller Entwurf des Beleuchtungssystems und der aktiven Modulatorfläche des DLP7000

Durch die Modellierung der aktiven Modulatorfläche unter Verwendung einzelner Mikrospiegel können die optischen Eigenschaften des nicht-sequentiellen Entwurfs sowohl in Bezug auf die Projektion von Lichtverteilungen und Symbolen als auch auf den Einfluss von Streu- und Reflexionsstrahlung realitätsnah abgebildet werden. In Zemax OpticStudio® ist dies mithilfe eines sogenannten MEMS-Objekts (mikro-elektromechanisches System) möglich. Hierbei handelt es sich um ein Array aus kleinen rechteckigen Spiegelflächen bzw. Pixeln, die sowohl einzeln als auch zeilen- und spaltenweise in einem *Cluster* von fünfzehn adressiert werden können. Die Adressierung ist dabei auf 3.750 einzelne Pixel bzw. 3.750 Zeilen oder Spalten begrenzt. Bei einer zeilen- oder spaltenweisen Adressierung ist eine Modellierung des DLP7000 mit 1.024×768 Mikrospiegeln möglich. Um jedoch Symbole projizieren zu können, ist eine individuelle Adressierung der einzelnen Mikrospiegel erforderlich. Unter Berücksichtigung des Seitenverhältnisses des DLP7000 (4:3) wird die Anzahl modellierbarer Mikrospiegel somit auf 64×48 reduziert. Aufgrund des umfangreichen optischen Systems und der erforderlichen Strahlanzahl zur Ver-

folgung bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Streu- und Reflexionsstrahlung wird die zu modellierende Anzahl einzelner Pixel auf 32×24 festgelegt. Ein einzelnes Pixel des modellierten DMDs entspricht somit 32×32 Mikrospiegel des DLP7000.

Das Vorgehen zur Adressierung der einzelnen Pixel des modellierten DMDs ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Zunächst werden auf Grundlage des Ternärsystems den jeweiligen Positionen (*Flat-State*, *On-State* oder *Off-State*) der einzelnen Pixel die Zahlenwerte 0, 1 und 2 zugewiesen. Damit das jeweilige Pixel innerhalb des *Clusters* jedoch in die gewünschte Position versetzt wird, ist mithilfe der Formel in Abbildung 6.10 eine Umrechnung vom Ternärsystem in das Dezimalsystem erforderlich. Dabei wird der zugewiesene Zahlenwert (S-Wert) eines einzelnen Pixels für das gesamte *Cluster* von fünfzehn Pixeln in einen Parameterwert (P-Wert) konvertiert. Durch Eingabe der P-Werte in der jeweiligen Parameterspalte der geclusterten Pixel werden die einzelnen Pixel des modellierten DMDs in die gewünschte Position versetzt und die unterschiedlichen Lichtverteilungen und Symbolprojektionen in Abschnitt 6.2.2 generiert.

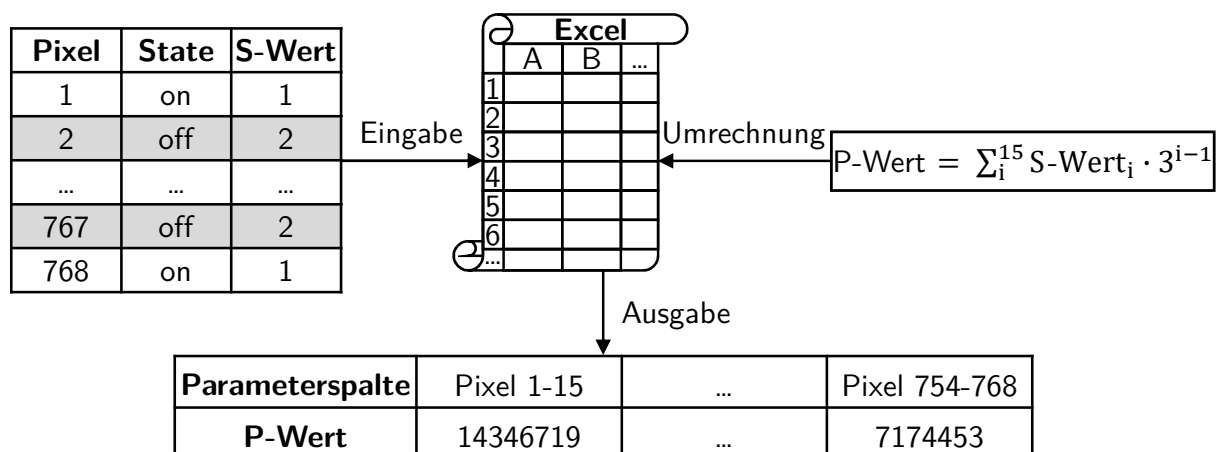


Abbildung 6.10: Vorgehen zur Adressierung der einzelnen Mikrospiegel des modellierten DMDs

In Abschnitt 5.7 werden zur Konzeptabsicherung des DMD-Scheinwerfers der Ist-Lichtstrom (4.079 lm) und Soll-Lichtstrom (3.534 lm) auf der aktiven Modulatorfläche ermittelt. Dabei werden für die Ermittlung verschiedene Annahmen im Hinblick auf den Wirkungsgrad der optischen Elemente sowie der Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche getroffen. Da im Rahmen des Entwurfsprozesses Abweichungen zu diesen Annahmen auftreten können, die im ungünstigsten Fall zu einer Nichterfüllung von lichttechnischen Anforderungen führen, ist es an dieser Stelle des Entwurfsprozesses sinnvoll den Ist-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche des modellierten DLP7000 zu analysieren. Darüber hinaus wird überprüft, ob die in Abschnitt 5.5.3 definierte Beleuchtungsstrategie mit einer homogenen Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche und die in Abschnitt 5.2.3 angenommenen Verluste von 16 % infolge der Überbeleuchtung eingehalten werden.

Für die Ermittlung des Ist-Lichtstroms, der Überbeleuchtung sowie der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche wird im nicht-sequentiellen Entwurf des Beleuchtungssystems ein $26,00 \times 19,50 \text{ mm}^2$ großer Detektor auf der Position des modellierten DLP7000 platziert (vgl. Abbildung 6.9). Die Strahlverfolgung wird dabei entsprechend der Randbedingungen, wie sie zu Beginn von Abschnitt 6.2.2 beschrieben werden, durchgeführt. Die Beleuchtungsstärkeverteilung auf dem Detektor und die Größe der aktiven Modulatorfläche ($14,00 \times 10,50 \text{ mm}^2$) ist in Abbildung 6.11 dargestellt.

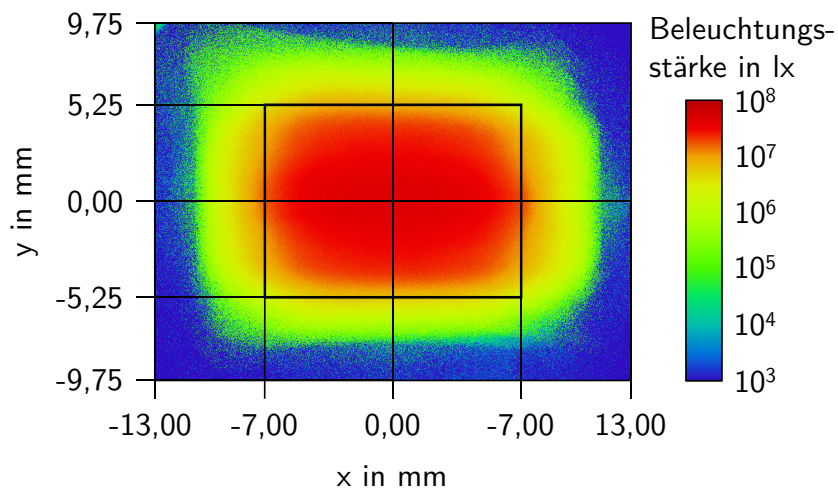


Abbildung 6.11: Beleuchtungsstärkeverteilung auf dem Detektor ($26,00 \times 19 \text{ mm}^2$) und der aktiven Modulatorfläche ($14,00 \times 10,50 \text{ mm}^2$) des modellierten DLP7000

Auf der Detektorfläche werden 4.000 lm detektiert und auf der aktiven Modulatorfläche 3.569 lm . Der Lichtstromverlust infolge der Überbeleuchtung beträgt somit $10,8\%$ und ist damit geringer als die in Abschnitt 5.2.3 angenommenen 16% (vgl. Tabelle 6.1). Für das Konzept des DMD-Scheinwerfers wird in Abschnitt 5.7 ein Ist-Lichtstrom von 4.079 lm und ein Soll-Lichtstrom von 3.534 lm auf der aktiven Modulatorfläche berechnet. Der Ist-Lichtstrom des nicht-sequentiellen Entwurfs ist somit geringer als für das Konzept berechnet, aber höher als der Soll-Lichtstrom der zur Erfüllung der 1.400 lm in einer Fernlichtverteilung mit einem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ notwendig ist. Eine Wirkungsgradbetrachtung der einzelnen optischen Elemente des nicht-sequentiellen Entwurfs erfolgt im anschließenden Abschnitt 6.2.2.

Tabelle 6.1: Ist-Lichtstrom und Lichtstromverlust durch Überbeleuchtung der Modulatorfläche für das Konzept und den nicht-sequentiellen Entwurf des DMD-Scheinwerfers

	Ist-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche in lm	Lichtstromverlust durch Überbeleuchtung in %
Konzept	4.079	16,0
Entwurf	3.569	10,8

Hinsichtlich der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche lässt sich bereits in Abbildung 6.11 erkennen, dass diese überwiegend homogen ist. Zu den Rand- und in den Eckbereichen der aktiven Modulatorfläche wird jedoch ein Abfall der Beleuchtungsstärke verzeichnet. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 6.12 in der ein Schnitt durch die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche bei 0 mm in x- und y-Richtung dargestellt ist.

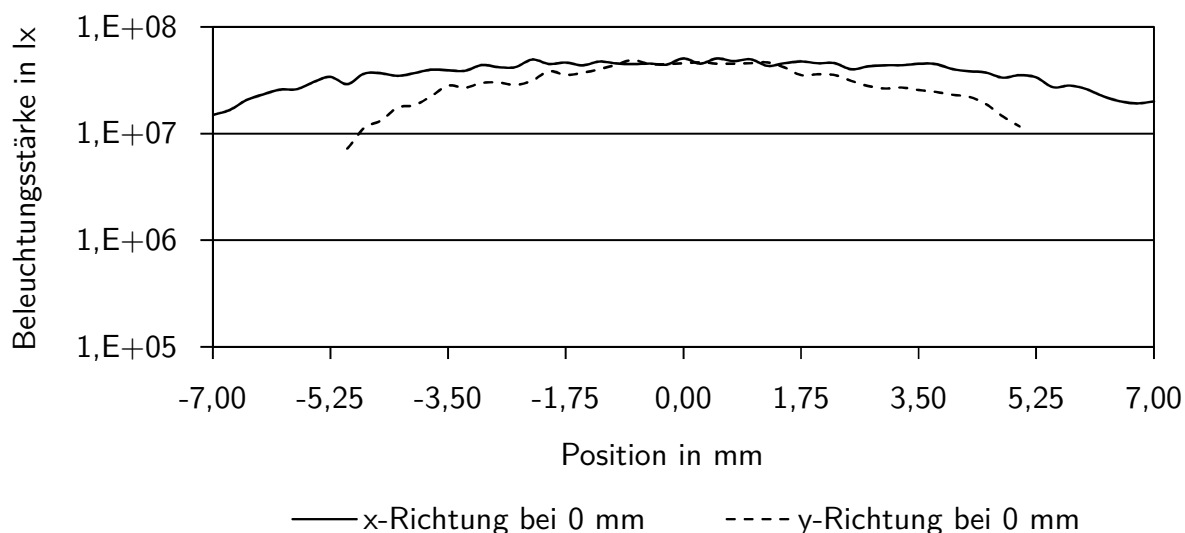


Abbildung 6.12: x-y-Schnitt bei 0 mm durch die Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche

Im Hinblick auf die radial verzeichnete Lichtverteilung im Verkehrsraum ist dem Beleuchtungsstärkeabfall zu den Rand- und in den Eckbereichen der aktiven Modulatorfläche jedoch keine negative Bedeutung beizumessen. Wie in Abbildung 5.18 aus Abschnitt 5.6 dargestellt, werden die Ecken und der obere Teil der radial verzeichneten Lichtverteilung nicht zur Ausleuchtung des FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ genutzt. Eine geringere Beleuchtungsstärke bzw. weniger Lichtstrom in diesen Bereichen der aktiven Modulatorfläche wirkt sich somit positiv auf den nutzbaren Lichtstromanteil der radial verzeichneten Lichtverteilung aus (vgl. Abschnitt 5.7).

Da wie in dem Konzept eine nahezu homogene Beleuchtungsstärkeverteilung auf der aktiven Modulatorfläche erzeugt wird und der Ist-Lichtstrom größer als der Soll-Lichtstrom ist, wird mit dem Entwurfsprozess des DMD-Scheinwerfers fortgefahren. Hierfür wird der sequentielle Entwurf des verzeichnenden Projektionssystems aus Abschnitt 6.1.4 in einen nicht-sequentiellen Entwurf überführt, die optischen Funktionsflächen der Linsen mit einer Antireflexbeschichtung versehen und zu dem in Abbildung 6.13 dargestellten vollständigen nicht-sequentiellen Entwurf des DMD-Scheinwerfers zusammengeführt.

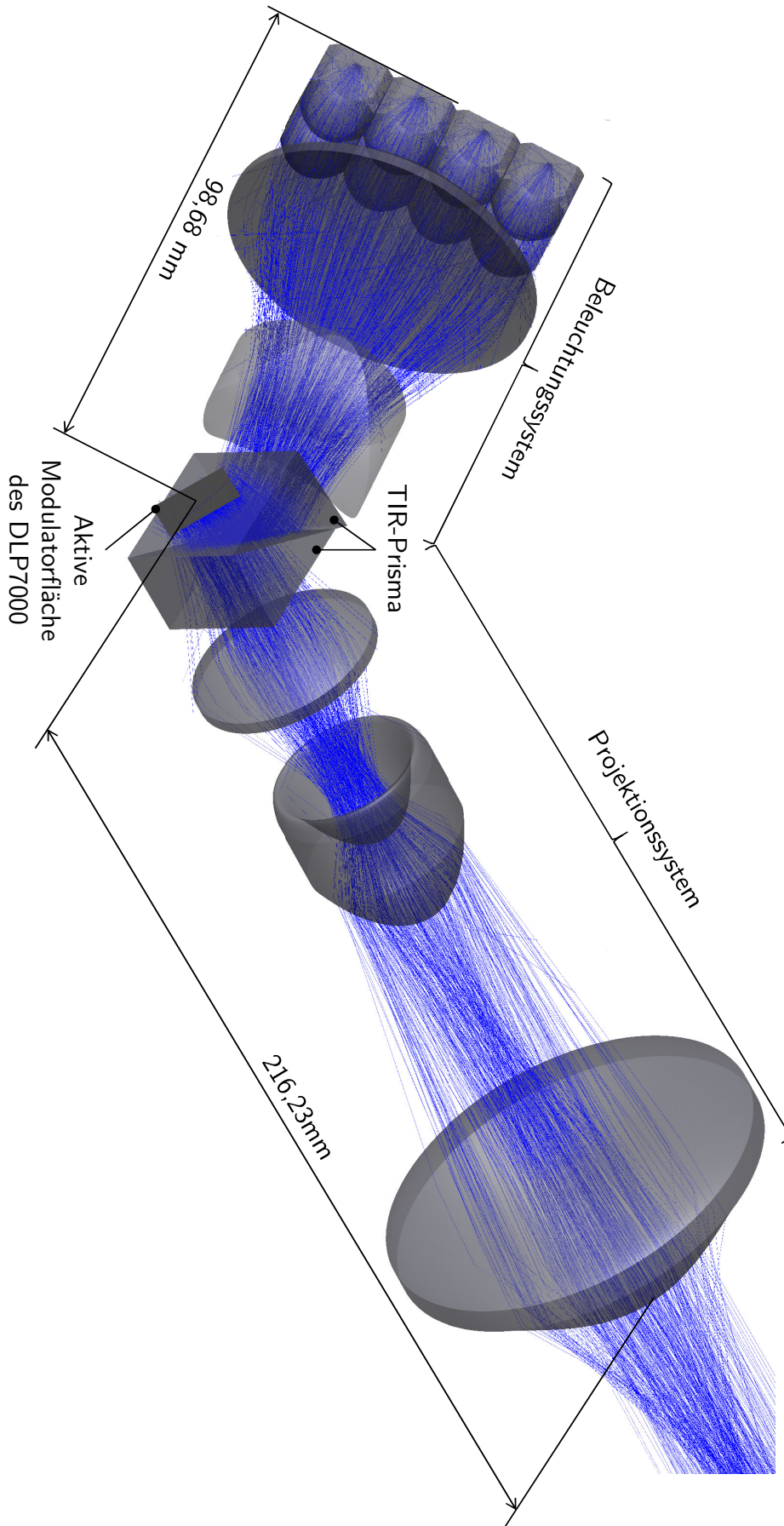


Abbildung 6.13: Vollständiger nicht-sequentieller Entwurf des DMD-Scheinwerfers

6.2.2 Strahlverfolgung durchführen und Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs bewerten

Mithilfe einer Strahlverfolgung lässt sich der Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen DMD-Scheinwerferentwurfs ermitteln, welcher vereinfacht das Verhältnis aus Lichtstrom im FOV und Lichtstrom des LED-Arrays ist. Der Lichtstrom im FOV ist jedoch von der projizierten Lichtverteilung abhängig. Darüber hinaus ist es sinnvoll die Wirkungsgrade der einzelnen optischen Elemente innerhalb des Systems zu kennen, um Abweichungen zu den in der Konzipierungsphase getroffenen Annahmen identifizieren und gezielt Maßnahmen zur Optimierung des Entwurfs durchführen zu können.

Auf Grundlage der Strahlverfolgung bei der die nachfolgenden Randbedingungen festgelegt werden, erfolgt daher zunächst die Ermittlung der Wirkungsgrade der einzelnen optischen Elemente und anschließend der Abblend- und Fernlichtverteilungen mit und ohne Symbolprojektion.

- Von jeder der acht modellierten LEDs werden 877 lm und $15 \cdot 10^6$ Strahlen emittiert.
- Mit Ausnahme der aktiven Modulatorfläche werden alle optischen Funktionsflächen der strahlformenden und -ablenkenden Elemente im System mit einer Antireflexbeschichtung versehen (vgl. Tabelle 5.1).
- Der Wirkungsgrad der aktiven Modulatorfläche des modellierten DMDs wird mit 68 % berücksichtigt [TEXA19c].
- Es werden Streu- und Reflexionsstrahlung im System berücksichtigt.

Wirkungsgrade der optischen Elemente

Der Gesamtlichtstrom des 2×4 Osram Oslon[®] Boost HL LED-Arrays ergibt sich auf Grundlage der LED-Anzahl sowie dem emittierten Lichtstrom bei einer Sperrschichttemperatur von 70 °C zu 7.016 lm (Abbildung 6.14). Der Akzeptanzwinkel einer Einzellinse des Linsenarrays ist mit $\pm 60^\circ$ auf die Étendue des DLP7000 abgestimmt (vgl. Abschnitt 5.3.2), sodass maximal 75 % des emittierten Lichtstroms nach dem Linsenarray genutzt werden können. Ausgehend von beschichteten Linsen mit einem Wirkungsgrad von 96 % (Abschnitt 5.2.3) ist ein Wirkungsgrad des Linsenarrays von 72 % zu erwarten. Bei einem detektierten Lichtstrom von 5.241 lm ist der Wirkungsgrad des Linsenarrays 74,7 %, welches nahezu dem Idealwert von 75 % entspricht. Von diesen 5.241 lm stehen nach der Sammellinse noch 4.379 lm zur weiteren Formung auf die aktive Modulatorfläche des DMDs zur Verfügung. Der Wirkungsgrad der Sammellinse ist somit 83,4 % und damit wesentlich geringer als die angenommenen 96 %.

Von der nachfolgenden Freiformlinse werden 4.225 lm auf das TIR-Prisma geformt, welches einem Wirkungsgrad von 96,5 % entspricht und damit nahezu den in Abschnitt 5.2.3 angenommenen 96 %. Mithilfe des TIR-Prismas werden 4.000 lm der 4.225 lm in Richtung der aktiven Modulatorfläche totalreflektiert, sodass an den Prismengrenzflächen Lichtstromverluste von 5,33 % auftreten. Dies stimmt annähernd mit den in Abschnitt 5.7 angenommenen 4 % überein. Der Ist-Lichtstrom auf der aktiven Modulatorfläche ist mit 3.569 lm geringer als die in Abschnitt 5.7 ermittelten 4.079 lm, jedoch höher als der berechnete Soll-Lichtstrom von 3.534 lm zur Erreichung der 1.400 lm in dem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$. Bedingt durch die überfüllende Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche erfolgt somit ein Lichtstromverlust von 10,8 %, welches geringer als die in Abschnitt 5.2.3 angenommenen 16 % ist. Die Lichtstromverluste an den Grenzflächen des TIR-Prismas sowie infolge der überfüllenden Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche sind mit 15,6 % geringer als die ursprünglich veranschlagten 19,4 %. Der Wirkungsgrad des optischen Systems zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche ist somit 50,9 %.

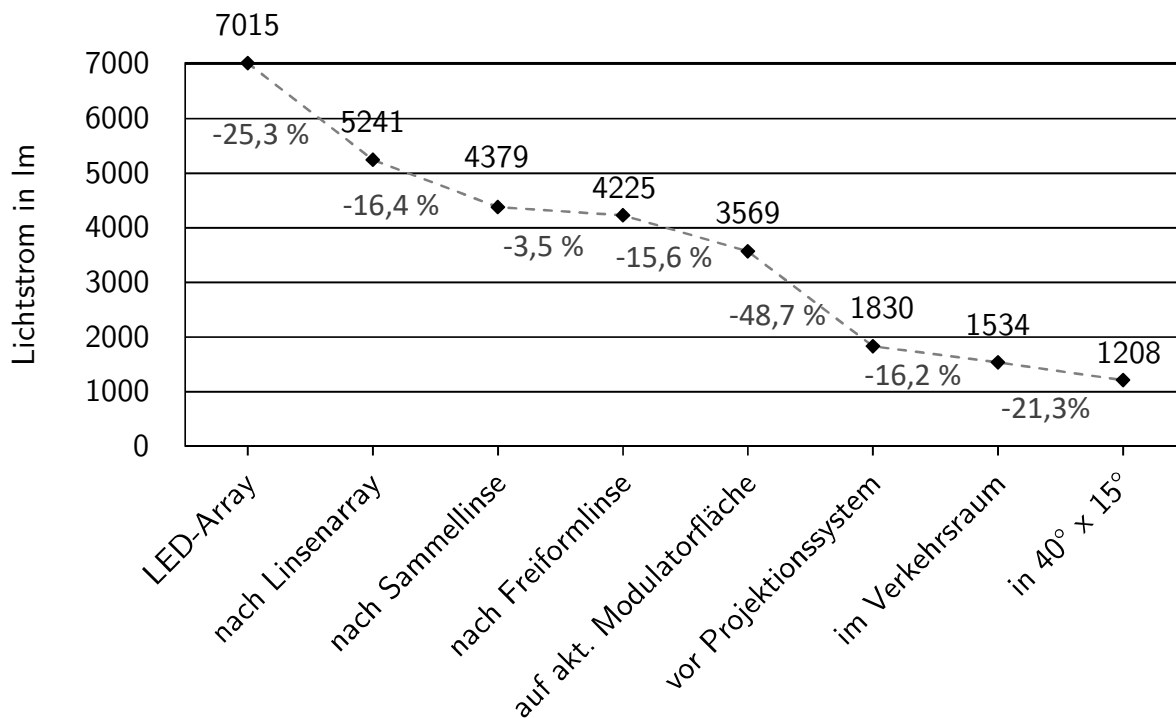


Abbildung 6.14: Lichtstromverluste an den einzelnen optischen Elementen des nicht-sequentiellen Optikentwurfs

Werden alle Mikrospiegel des modellierten DMDs in den *On-State* versetzt, erfolgt die Reflexion von 1.830 lm in das Projektionssystem. Die auftretenden Lichtstromverluste in Höhe von 48,7 % werden dabei zum einen durch den DMD und zum anderen durch das TIR-Prisma verursacht. Der Wirkungsgrad des DMDs ist 68 % [TEXA19c], sodass sich der Wirkungsgrad des Prismas zu 75,4 % ergibt. Bei vier Prismengrenzflächen an denen Lichtstromverluste auf-

treten, bedeutet dies 6,8% Verluste je Grenzfläche, welches höher als die in Abschnitt 5.7 veranschlagten 2% ist.

Mithilfe des Projektionssystems werden 1.534 lm der 1.830 lm in den Verkehrsraum projiziert. Der Wirkungsgrad des Dreilinsensystems ist somit 83,6% und damit etwas geringer als die in Abschnitt 5.7 angenommenen 88,5%. In dem geforderten FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ wird ein Lichtstrom von 1.208 lm erreicht. Der ungenutzte Lichtstromanteil der radialen Verzeichnung ergibt sich somit zu 21,3% und ist damit 6,3% höher als in Abschnitt 5.7 veranschlagt.

Unter der Voraussetzung, dass alle Mikrospiegel des modellierten DMDs in den *On-State* versetzt sind, ergibt sich bei der Ausleuchtung des FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ ein Gesamtwirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs von 17,2%.

Im Rahmen der Wirkungsgradanalyse des nicht-sequentiellen DMD-Scheinwerferentwurfs wird gezeigt, dass die optischen Elemente an denen die höchsten Lichtstromverluste auftreten die Sammellinse (16,4%) und das TIR-Prisma (24,6%) sind. Der Wirkungsgrad des DMDs wird hier vernachlässigt, da dieser nicht beeinflusst werden kann. Für den sequentiellen Entwurf der Sammellinse wird eine neue Emissionscharakteristik und -fläche (Lichtquelle) definiert, welches auf Grundlage einer Auswertung des nicht-sequentiellen Entwurfs von LED-Array und Linsenarray erfolgt. In Bezug auf die Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme ist dieses Vorgehen in dem undefinierten Übergang zwischen sequentiellem und nicht-sequentiellem Entwurf einzuordnen (vgl. Abbildung 4.2, Abschnitt 4.2).

Auch die erhöhten Lichtstromverluste an den Grenzflächen des TIR-Prismas, wenn die Lichtstrahlen von der aktiven Modulatorfläche in das Projektionssystem reflektiert werden, lassen sich durch den undefinierten Bereich in der Methode erklären. Die Möglichkeit das Beleuchtungs- und Projektionssystem bei einer telezentrischen Systemarchitektur unabhängig voneinander entwerfen zu können (vgl. Abschnitt 5.4), wird für den sequentiellen Entwurf beider Systeme genutzt. Anschließend wird der DMD-Scheinwerfer im Rahmen des nicht-sequentiellen Entwurfs durch das Zusammenführen von Beleuchtungs- und Projektionssystem unter Verwendung des TIR-Prismas aufgebaut.

Wirkungsgrad der Abblend- und Fernlichtverteilung

Im Hinblick auf die Anforderungen (vgl. Tabelle 5.1) werden im Folgenden simulierte Abblend- und Fernlichtverteilungen mit und ohne Symbolprojektion analysiert. Für die Abblend- und Fernlichtverteilung ohne Symbolprojektion ist ein Wirkungsgrad von mindestens 8,2% bzw. 12,6% zu erreichen. Die Beleuchtungsstärke im Punkt B50L der Abblendlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion darf entsprechend der ECE-Regelung 123 [ECE123] einen Wert

von 0,5 lx nicht überschreiten. Bei der Fernlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion ist im Punkt HV eine Beleuchtungsstärke von mindestens 120 lx zu erreichen. Für die Symbolprojektion ist ein horizontaler Winkelbereich von $\pm 11,9^\circ$ und ein vertikaler Winkelbereich von 0° bis $-9,1^\circ$ einzuhalten.

Abblendlichtverteilung

Für die Erzeugung der Abblendlichtverteilung mit einer HDG werden in Bezug auf das FOV alle Mikrospiegel des modellierten DMDs unterhalb von 0° vertikal in den *On-State* und oberhalb von 0° vertikal in den *Off-State* versetzt. In dem horizontalen Winkelbereich von 0° bis $+20^\circ$ wird oberhalb von 0° vertikal eine zusätzliche Reihe von Mikrospiegeln in den *On-State* versetzt, sodass der typische Knick im Punkt HV erzeugt wird. Die simulierte Abblendlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers ist in Abbildung 6.15 dargestellt.

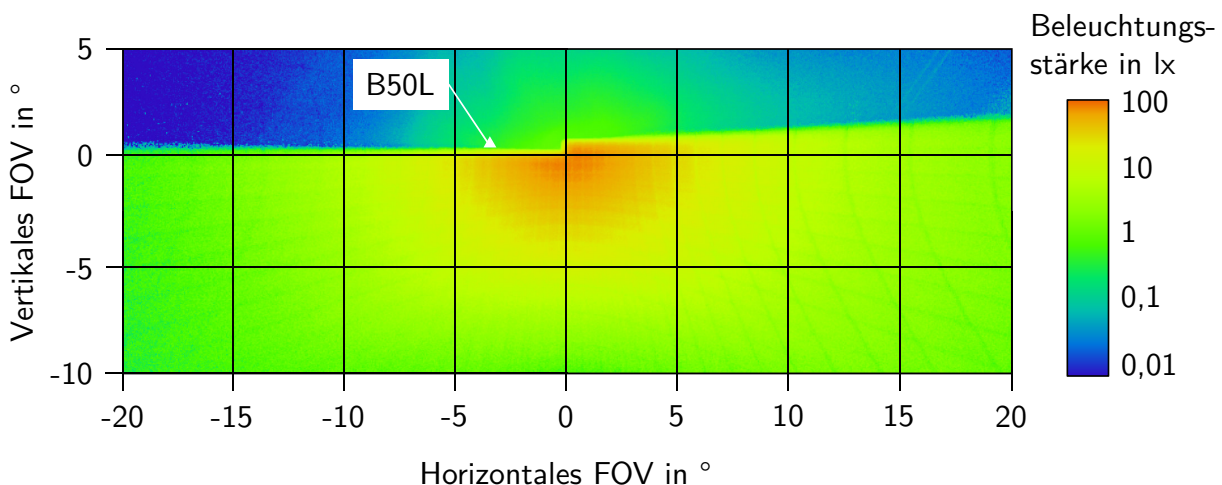


Abbildung 6.15: Simulierte Abblendlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers

In dem spezifizierten FOV von $\pm 20^\circ$ horizontal und $+5^\circ$ bis -10° vertikal wird ein Lichtstrom von 685 lm emittiert und eine maximale Beleuchtungsstärke von $E_{\text{Max}} = 88 \text{ lx}$ erreicht. Mit einer Beleuchtungsstärke von 0,43 lx im Punkt B50L wird der in der ECE-Regelung 123 [ECE123] spezifizierte Maximalwert von 0,5 lx eingehalten.

Für die simulierte Abblendlichtverteilung ist in Abbildung 6.16 ein horizontaler und vertikaler Schnitt durch die Beleuchtungsstärkeverteilung bei jeweils 0° dargestellt. Da der horizontale Schnitt durch die Beleuchtungsstärkeverteilung in dem Winkelbereich von -20° bis 0° genau entlang der HDG und in dem Winkelbereich von 0° bis $+20^\circ$ unterhalb der HDG verläuft, ist das Schnittbild leicht asymmetrisch. Die Asymmetrie wird insbesondere im Winkelbereich von -5° bis 0° wo das Projektionssystem eine hohe Abbildungsschärfe hat deutlich.

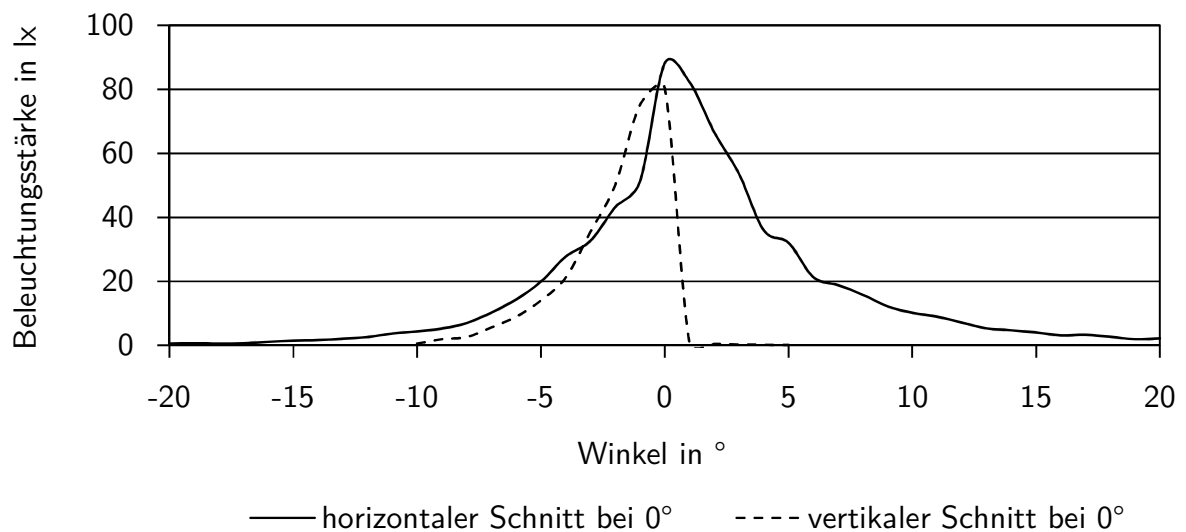


Abbildung 6.16: Horizontaler und vertikaler Schnitt durch die simulierte Abblendlichtverteilung

Die hohe Abbildungsschärfe im zentralen Bereich der Lichtverteilung wird ebenfalls bei dem vertikalen Schnitt, welcher exakt durch den Knick bei HV verläuft, ersichtlich. Die maximale Beleuchtungsstärke in HV ist hier mit 81 lx etwas geringer als beim horizontalen Schnitt und bei 1° vertikal nahezu 0 lx.

In Abbildung 6.17 ist die simulierte Abblendlichtverteilung in der zusätzlich ein Pfeil projiziert wird dargestellt. Der Pfeil wird in einem Winkelbereich von $\pm 3,2^\circ$ horizontal und $-1,5^\circ$ bis $-6,5^\circ$ vertikal projiziert, in dem 37 Pixel des modellierten DMDs in den *Off-State* versetzt werden. Dies entspricht 37.888 Mikrospeigeln des DLP7000. Die Anforderungen für den vertikalen und horizontalen Projektionsbereich (vgl. Tabelle 5.1) werden somit erfüllt. Da für die Pfeilprojektion zusätzlich Pixel des modellierten DMDs in den *Off-State* versetzt werden, wird auch weniger Licht in das Projektionssystem reflektiert.

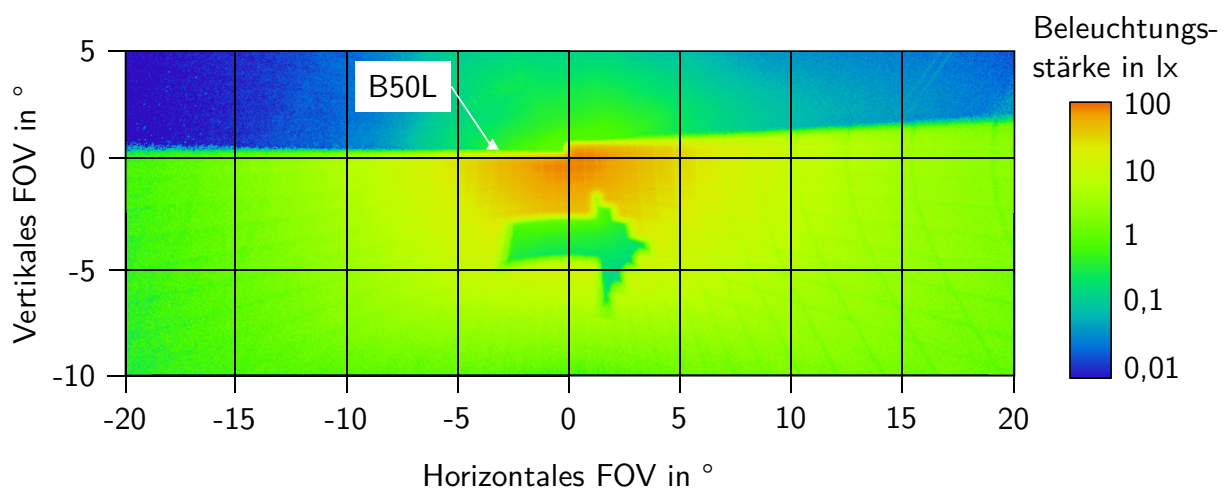


Abbildung 6.17: Simulierte Abblendlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers mit Pfeilprojektion

Der Lichtstrom in der Abblendlichtverteilung wird aufgrund der Pfeilprojektion von 685 lm auf 609 lm reduziert. Weiterhin erfolgt ebenfalls eine Abnahme der maximalen Beleuchtungsstärke auf 80 lx im Punkt HV sowie auf 0,4 lx im Punkt B50L. Die photometrischen Werte der Abblendlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Photometrische Werte der Abblendverteilung mit und ohne Symbolprojektion

Abblendlicht	Lichtstrom in lm	E_{Max} in lx	E_{B50L} in lx
ohne Projektion	686	88	0,43
mit Projektion	609	80	0,40

Der Kontrast der Pfeilprojektion lässt sich nach DIN 32975 [DIN32975] über den relativen Leuchtdichteunterschied zwischen der Leuchtdichte im Pfeil (L_P) und der Umgebungsleuchtdichte (L_U) mithilfe der Gleichung 6.2 bestimmen. Bei einem Negativkontrast ist L_P geringer als L_U , sodass $K_{\text{Pfeil}} < 0$ gilt. Ein Positivkontrast ($K_{\text{Pfeil}} > 0$) ergibt sich somit für $L_P > L_U$.

$$K_{\text{Pfeil}} = \frac{L_P - L_U}{L_P + L_U} \quad \text{mit} \quad -1 \leq K_{\text{Pfeil}} \leq +1 \quad (6.2)$$

Der Abstand zwischen den beiden Leuchtdichtemesspunkten L_P und L_U bleibt jedoch wie auch bei anderen Kontrastdefinitionen unberücksichtigt. In Kombination mit der inhomogenen Ausleuchtung des Verkehrsraums werden somit je nach Messpunkt unterschiedliche Kontrastwerte ermittelt. Verdeutlichen lässt sich dies mithilfe der Abbildung 6.18, in der ein horizontaler Schnitt bei $-3,8^\circ$ und ein vertikaler Schnitt bei 0° durch die Leuchtdichteverteilung des simulierten Abblendlichts mit Pfeilprojektion dargestellt ist.

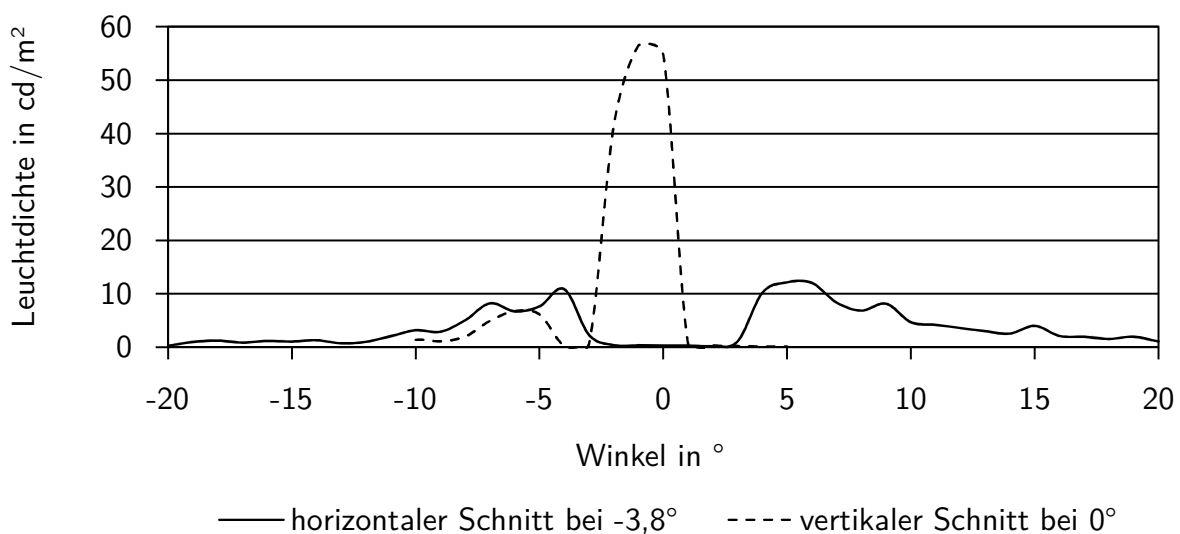


Abbildung 6.18: Schnitte durch die simulierte Leuchtdichteverteilung des Abblendlichts mit Pfeilprojektion

In Bezug auf den horizontalen Schnitt ist die Leuchtdichte bei -4° , also kurz vor dem Pfeil $10,9 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Bei $+4^\circ$ direkt hinter der Pfeilspitze beträgt die Leuchtdichte $10,2 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. In der Pfeilmittle bei 0° ist die Leuchtdichte $0,3 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Entsprechend der Gleichung 6.2 ergibt sich K_{Pfeil} für die gewählten Messpunkte jeweils zu $-0,946$. Für den vertikalen Schnitt durch die Leuchtdichteverteilung ergeben sich andere Kontraste. Bei $-3,5^\circ$ ist $L_p = 0,47 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. L_u ist mit $41,46 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ bei -2° deutlich höher als mit $6,12 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ bei -5° . Je nach Winkel ist $K_{\text{Pfeil}} = -0,977$ bzw. $K_{\text{Pfeil}} = -0,857$.

In der DIN 18040 Teil 3 [DIN 18040-3] sind für eine starke visuelle Abhebung von Bereichen mit hoher und niedriger Leuchtdichte Richtwerte für den Leuchtdichtekontrast aufgeführt. Für das Anzeigen von Warnungen und schriftlichen Informationen ist für einen positiven Leuchtdichtekontrast ein Wert von $> 0,7$ bzw. für einen negativen Leuchtdichtekontrast ein Wert von $< -0,7$ angemessen. Die hier beispielhaft berechneten Kontrastwerte erfüllen alle das Kriterium $K_{\text{Pfeil}} < -0,7$.

Fernlichtverteilung

Zur Erzeugung der Fernlichtverteilung werden alle Mikrospiegel des modellierten DMDs in den *On-State* versetzt, sodass für das FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ die in Abbildung 6.19 dargestellte Lichtverteilung erzeugt wird. Ein Horizontal- und Vertikalschnitt durch die Fernlichtverteilung bei jeweils 0° ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Mit einem Lichtstrom von 1.208 lm und einer maximalen Beleuchtungsstärke von 89 lx in HV werden die spezifizierten Anforderungen (vgl. Tabelle 5.1) von 1.400 lm und 120 lx nicht erreicht.

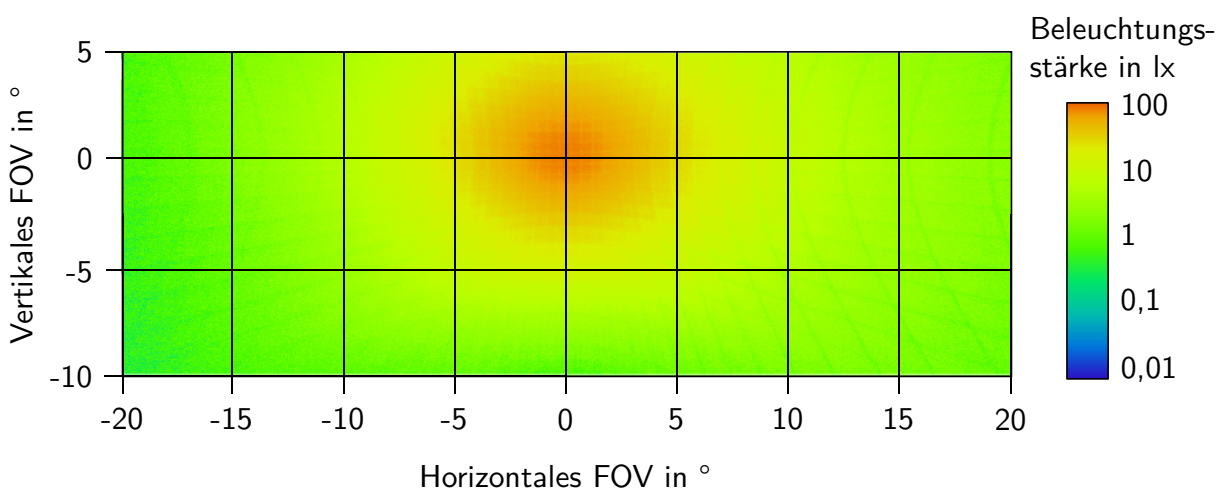


Abbildung 6.19: Simulierte Fernlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers

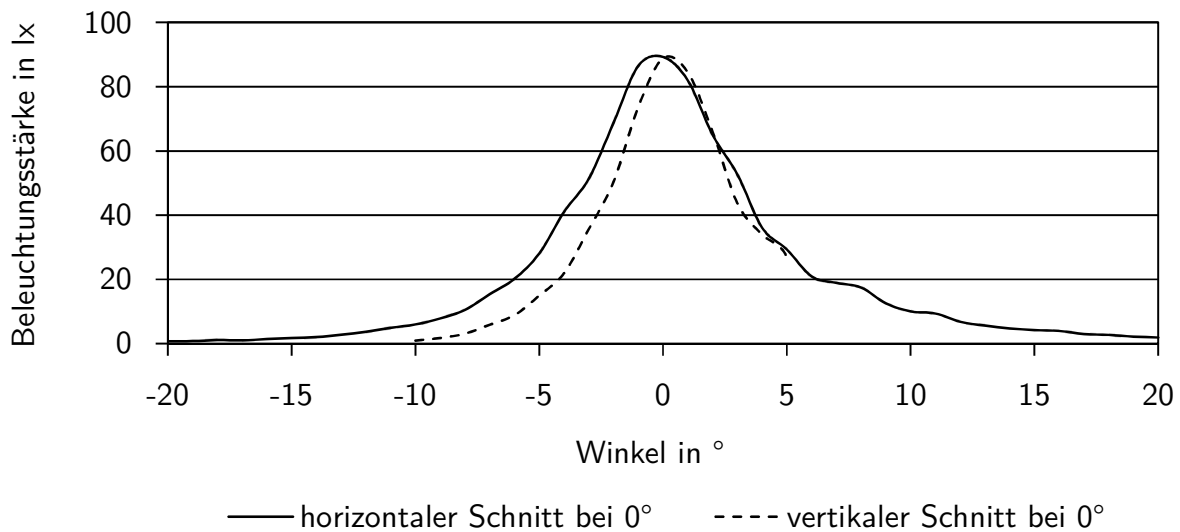


Abbildung 6.20: Horizontaler und vertikaler Schnitt durch die simulierte Fernlichtverteilung

Um den Einfluss einer Projektion auf den Lichtstrom und die maximale Beleuchtungsstärke in HV auch für die Fernlichtverteilung zu analysieren, wird wie in Abbildung 6.21 dargestellt, die Zahl 80 projiziert. In einem Winkelbereich von $\pm 3,7^\circ$ horizontal und $-1,7^\circ$ bis $-7,4^\circ$ vertikal wird die Zahl 80 durch 38 in den *Off-State* versetzte Pixel des modellierten DMDs erzeugt. Davon entfallen 20 Pixel auf die Ziffer 8 und 18 Pixel auf die Ziffer 0. Der Lichtstrom in der Lichtverteilung wird wie beim Abblendlicht aufgrund der Symbolprojektion reduziert und beträgt 1.134 lm. Die maximale Beleuchtungsstärke in HV wird um 2 lx auf 87 lx verringert.

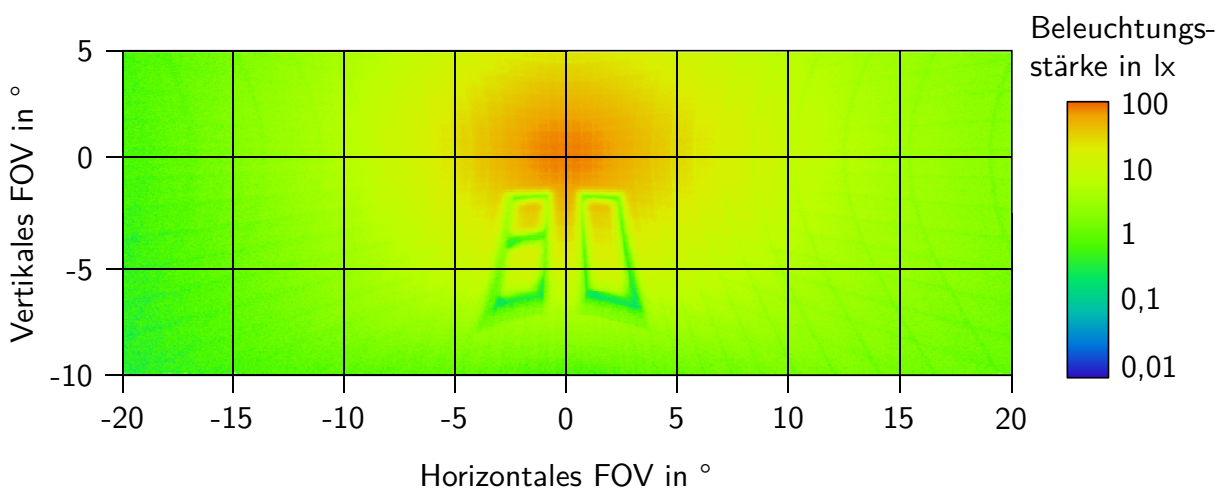


Abbildung 6.21: Simulierte Fernlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers mit 80-Projektion

Eine Gegenüberstellung der photometrischen Werte für die Fernlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion ist in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Photometrische Werte der Fernlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion

Fernlicht	Lichtstrom in lm	E_{Max} in lx
ohne Projektion	1.208	89
mit Projektion	1.134	87

In Abbildung 6.22 ist ein horizontaler Schnitt bei $-3,8^\circ$ und ein vertikaler Schnitt bei $-1,7^\circ$ durch die Leuchtdichtevertellung des simulierten Fernlichts mit 80-Projektion dargestellt. Der horizontale Schnitt verläuft dabei durch die mittlere horizontale der Ziffer 8 und der vertikale Schnitt senkrecht durch die Ziffer 8. Analog zur Pfeilprojektion wird mithilfe der Gleichung 6.2 der Kontrast für verschiedene Winkelbereiche ermittelt.

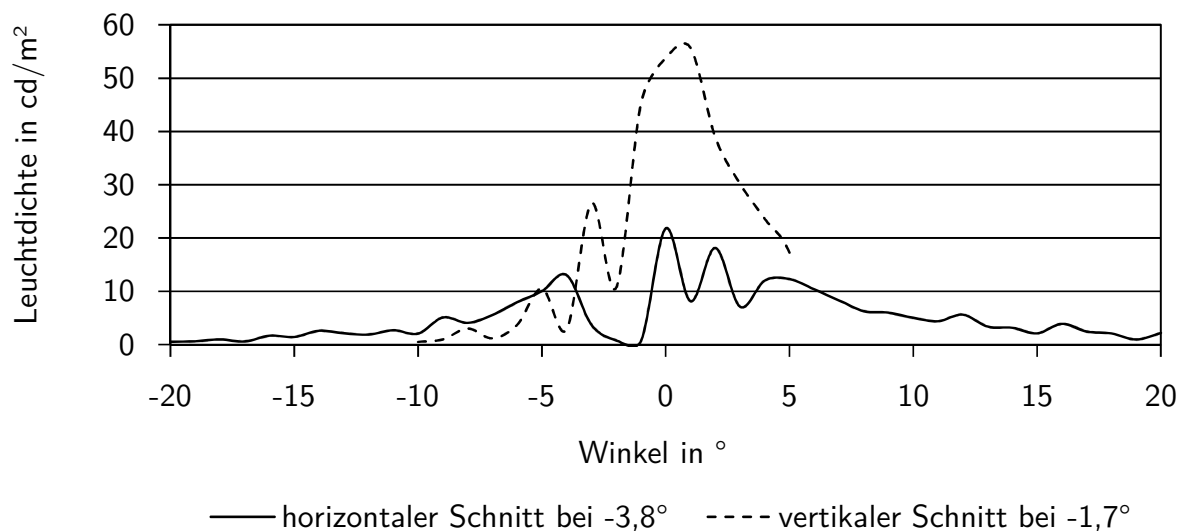


Abbildung 6.22: Schnitte durch die simulierte Leuchtdichtevertellung des Fernlichts mit 80-Projektion

Beim horizontalen Schnitt beträgt die Leuchtdichte bei 0° also genau zwischen den beiden Ziffern $21,8 \frac{cd}{m^2}$. In der Ziffer 8 bei -1° wird eine Leuchtdichte von $0,643 \frac{cd}{m^2}$ erzeugt, sodass sich ein Kontrast von $-0,943$ ergibt. Für den Winkel $+1^\circ$, der durch die Ziffer 0 verläuft, beträgt die Leuchtdichte $8,13 \frac{cd}{m^2}$. Der Kontrast ergibt sich somit zu $-0,457$ und ist damit geringer als der in der DIN 18040 Teil 3 [DIN 18040-3] angegebene Wert von mindestens $-0,7$ für das Anzeigen von Warnungen und schriftlichen Informationen. Auch beim vertikalen Schnitt werden Kontrastwerte die größer als $-0,7$ sind, erreicht. Dies ist insbesondere in den filigranen Strukturen der Ziffern, verglichen mit der Pfeilprojektion, begründet. Werden mehr Pixel des modellierten DMDs in den *Off-State* versetzt, sind Kontrastwerte von $< -0,7$ zu erwarten.

Die Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion werden, wie zu Beginn dieses Abschnitts erläutert, aus dem Verhältnis von Lichtstrom im FOV der jeweiligen Lichtverteilung und Lichtstrom des LED-Arrays ermittelt und sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst. In Abschnitt 5.1 bzw. Tabelle 5.1 wird für die Abblendlichtverteilung ohne Symbolprojektion ein Wirkungsgrad von mindestens 8,2% und für die Fernlichtverteilung von mindestens 12,6% gefordert. Ohne Symbolprojektion werden bei den simulierten Lichtverteilungen im Abblendlicht 9,8% und im Fernlicht 17,2% erreicht. Auch mit Symbolprojektion sind die Wirkungsgrade mit 8,7% bzw. 16,2% höher als gefordert, sodass diese Anforderungen erfüllt werden.

Tabelle 6.4: Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion

	Abblendlicht	Abblendlicht mit Pfeil	Fernlicht	Fernlicht mit 80
Wirkungsgrad η_L in %	9,8	8,7	17,2	16,2

Da in Bezug auf die Anforderungen der Lichtstrom von 1.400 lm bei der Fernlichtverteilung ohne Symbolprojektion und die maximale Beleuchtungsstärke von 120 lx in HV nicht erreicht werden, erfolgt im nächsten Abschnitt eine Optimierungsschleife. Ziel ist die Identifikation von Maßnahmen zur Erhöhung des Lichtstroms im FOV und der Beleuchtungsstärke in HV auf Grundlage derer eine Optimierung des nicht-sequentiellen DMD-Scheinwerferentwurfs erfolgt.

6.3 Optimierungsschleife

Für die Optimierung des nicht-sequentiellen Entwurfs werden innerhalb der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme zwei Schleifen vorgehalten (vgl. Abbildung 4.2, Abschnitt 4.2). Entwürfe, bei denen keine unüberwindbaren Abweichungen zu den anfänglich definierten lichttechnischen Anforderungen auftreten, können durch kleinere Anpassungen optimiert werden. Hierfür ist zu dem Schritt „Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen“ zurückzukehren, um durch Modifikationen beispielsweise dem Hinzufügen weiterer Funktionsflächen oder Parameter und stärkerem Restriktieren der Randbedingungen eine Optimierung herbeizuführen. Anschließend werden die jeweils nachfolgenden Entwurfsschritte erneut durchgeführt.

Werden die Anforderungen auch bei mehrmaligem Durchlaufen dieser Schleife dennoch nicht erfüllt bzw. ist abzusehen, dass mit dieser Optimierungsschleife eine Anforderungserfüllung nicht erreicht werden kann, ist über die zweite Schleife zu der Methode zum Konzipieren

hochauflösender Lichtsysteme zurückzukehren. Durch eine erneute Überprüfung der einzelnen Konzipierungsschritte werden unter Berücksichtigung der Optimierungsziele Maßnahmen zu deren Erreichung analysiert und identifiziert, welches gegebenenfalls ein vollständig neues Konzept erfordert.

Da bei dem nicht-sequentiellen Entwurf des DMD-Scheinwerfers lediglich der Lichtstrom im FOV und die Beleuchtungsstärke in HV nicht erreicht werden und die Abweichungen moderat sind, bietet es sich an den Entwurf durch kleinere Anpassungen zu optimieren (erste Schleife). Um jedoch den Zusammenhang der beiden Methoden zu verdeutlichen, wird im Folgenden in die Konzipierungsphase zurückgekehrt (zweite Schleife).

6.3.1 Maßnahmen zur Erhöhung des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke

Für die Identifikation von Maßnahmen zur Erhöhung des Lichtstroms im FOV und der Beleuchtungsstärke in HV werden im Folgenden die einzelnen Entscheidungen, welche im Rahmen der Konzipierung getroffen wurden und die Anforderungserfüllung beeinflussen, analysiert. Der Konzipierungsschritt „Anforderungen definieren“ wird dabei ausgelassen, da eine Anpassung der Anforderungen beispielsweise der Reduktion des Lichtstroms nicht zielführend ist.

Den beiden Optimierungszielen Lichtstrom im FOV und Beleuchtungsstärke in HV erhöhen, sind in Tabelle 6.5 den einzelnen Konzipierungsschritten verschiedene Maßnahmen zugeordnet, die im Nachfolgenden erläutert werden. Eine Verbesserung des jeweiligen Optimierungsziels ist durch ein (+), keine Verbesserung durch ein (o) und eine Verschlechterung durch ein (-) gekennzeichnet. Die Bewertung der Maßnahmen erfolgt dabei unabhängig voneinander, wenngleich diese auch in Kombination miteinander umgesetzt werden können. Ziel ist die Identifikation einer einzelnen Maßnahme mithilfe derer sowohl der Lichtstrom im FOV als auch die Beleuchtungsstärke in HV maximal erhöht werden können.

Lichtmodulator festlegen

Der Einsatz eines größeren Lichtmodulators ist, unter der Annahme gleicher Wirkungsgrade des Beleuchtungs- und Projektionssystems unter Verwendung des 2x4 Oslon[®] Boost HL LED-Array zur Lichterzeugung, nicht zielführend, da mit dieser Maßnahme weder eine Erhöhung des Lichtstroms noch der Beleuchtungsstärke erreicht wird.

Lichterzeugung spezifizieren

Durch die Lichterzeugung mittels additiver Farbmischung unter Verwendung der Ostar[®] Projection Power LEDs aus Abschnitt 5.3.1 wird mit einem nutzbaren Lichtstromanteil

von 5.144 lm ein um 343 lm höherer Lichtstrom als mit dem 2x4 Oslon® Boost HL LED-Array erzeugt. Ausgehend von einem unveränderten Systemwirkungsgrad besteht so die Möglichkeit den Lichtstrom in $40^\circ \times 15^\circ$ von 1.208 lm auf 1.294 lm zu steigern. Bei gleichbleibender radialer Verzeichnung ist eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke in HV um 6,5 lx auf 98,5 lx zu erwarten.

Systemarchitektur determinieren

Im Hinblick auf die Systemarchitektur ist eine Änderung zur nicht-telezentrischen Systemarchitektur, um eine Erhöhung des Lichtstroms im FOV und der Beleuchtungsstärke in HV zu erreichen, nicht zielführend. Bedingt durch die Winkelerhöhung zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche, damit eine ausreichende Trennung des Strahlengangs vom Beleuchtungs- und Projektionssystem erreicht wird, ist eine Reduktion der Étendue des DLP7000 die Folge. Infolgedessen wird vom DMD weniger Licht moduliert, was zu einer Abnahme des Gesamtlichtstroms und damit auch der Beleuchtungsstärke in HV führt.

Wird bei der telezentrischen Systemarchitektur anstelle des konventionellen TIR-Prismas ein funktionsintegriertes TIR-Prisma mit entsprechender Linsengeometrie verwendet (vgl. Abbildung 5.9, Abschnitt 5.4.1), kann der Einsatz einer Freiformlinse entfallen. Unter den Annahmen, dass der Wirkungsgrad des konventionellen TIR-Prismas auf das integrierte TIR-Prisma angewendet wird und die Wirkungsgrade der restlichen Systemelemente unverändert bleiben, wird nur eine geringfügige Erhöhung des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke erreicht. Grund hierfür ist, dass durch die Freiformlinse des Beleuchtungssystems die geringsten Verluste (3,5 %) im System verursacht werden. Bei gleichbleibender radialer Verzeichnung wird der Lichtstrom im FOV lediglich von 1.208 lm auf 1.252 lm und die Beleuchtungsstärke in HV von 92 lx auf circa 95 lx gesteigert.

Beleuchtungsstrategie definieren

Durch eine inhomogene Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche bei der eine hohe Beleuchtungsstärke in der Mitte erzeugt wird (vgl. Abbildung 5.15, Abschnitt 5.5.2), kann bei gleichbleibender radialer Verzeichnung die Beleuchtungsstärke in HV erhöht werden. Eine Steigerung des Lichtstroms im FOV wird bei unverändertem Wirkungsgrad des Beleuchtungs- und Projektionssystems jedoch nicht erreicht.

Eine Optimierung der homogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche lässt sich durch eine Verbesserung des Wirkungsgrads vom Beleuchtungssystem erwirken. Mit 16,4 % werden von der Sammellinse des Beleuchtungssystems die meisten Verluste hervorgerufen. Ausgehend von einer unveränderten Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche ist jedoch der Wirkungsgrad der Sammellinse auf 98 % zu steigern, damit in

dem FOV ein Lichtstrom von 1.400 lm erreicht wird. Bei gleichbleibender radialer Verzeichnung ist eine Beleuchtungsstärke von 103 lx in HV zu erwarten.

Werden jedoch im Rahmen der Optimierung zusätzlich die Verluste infolge der Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche von 10,8 % (vgl. Abschnitt 6.2.2) auf 6 % reduziert, ist eine geringere Wirkungsgradsteigerung der Sammellinse von 83,6 % auf 92 % erforderlich. Eine weitere Zunahme der Beleuchtungsstärke in HV kann damit jedoch nicht erreicht werden.

Tabelle 6.5: Bewertung der Maßnahmen zur Erreichung der Optimierungsziele

Konzipierungsschritt	Maßnahme	Optimierungsziel	
		Lichtstrom im FOV erhöhen	Beleuchtungsstärke in HV erhöhen
Lichtmodulator festlegen	größerer Lichtmodulator	o	o
Lichterzeugung spezifizieren	additive Farbmischung mittels separater LEDs	+	+
Systemarchitektur determinieren	nicht-telezentrisch mit direkter Beleuchtung	-	-
	telezentrisch mit integriertem TIR-Prisma	o	o
Beleuchtungsstrategie definieren	inhomogene Beleuchtung	o	+
	homogene Beleuchtung optimieren	+	+
Verzeichnung abstimmen	anamorphotisch	+	-
	radiale Verzeichnung optimieren	+	+

Verzeichnung abstimmen

Wird für das Projektionssystem eine anamorphotische Verzeichnung abgestimmt, kann bei gleichbleibendem Systemwirkungsgrad der geforderte Lichtstrom von 1.400 lm in dem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ erreicht werden. Anders als bei der radialen Verzeichnung können die gesamten 1.534 lm im Verkehrsraum genutzt werden (vgl. Abbildung 6.14, Abschnitt 6.2.2). Allerdings wird bei einer unverändert homogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche keine Steigerung sondern eine Reduktion der Beleuchtungsstärke in HV erzeugt, da der Verkehrsraum ebenfalls homogen ausgeleuchtet wird.

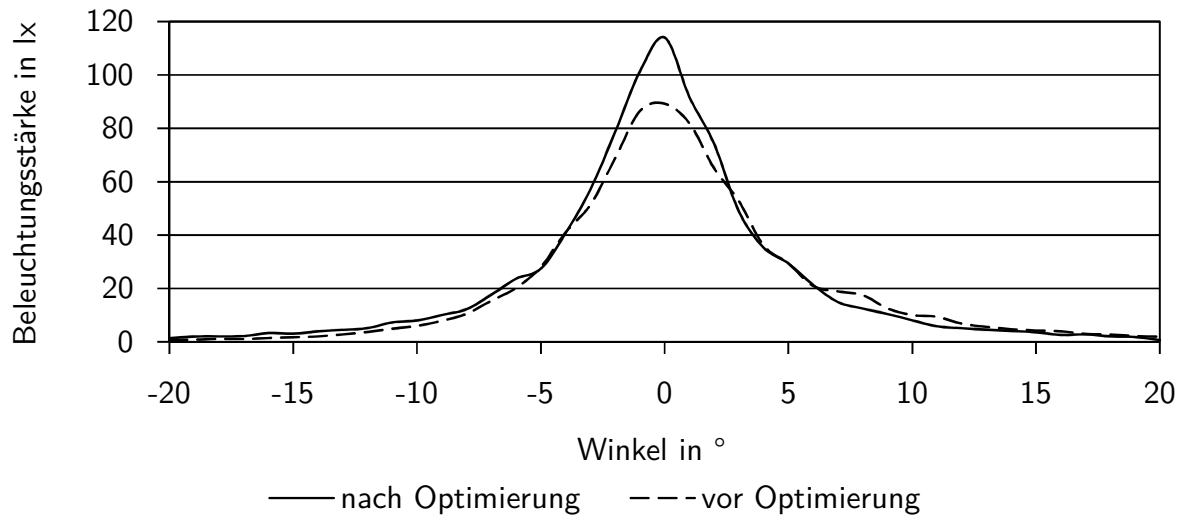
Eine Optimierung der radialen Verzeichnung des Projektionssystems ermöglicht sowohl eine Steigerung der Beleuchtungsstärke in HV als auch des Lichtstroms im FOV. Durch eine effizientere Umverteilung kann zum einen der Lichtstromanteil im FOV als auch die Beleuchtungsstärke gesteigert werden. Aktuell werden 21,3 % des in den Verkehrsraum projizierten Lichts abgeschnitten. Wird dieser Anteil auf 10 % reduziert können nahezu 1.400 lm im FOV erreicht werden. Gleichzeitig ist durch eine effizientere Umverteilung eine deutlich höhere Beleuchtungsstärke in HV möglich.

Die größten Optimierungspotenziale werden somit durch die Maßnahmen „additive Farbmischung mittels separater LEDs“, „homogene Beleuchtung optimieren“ und „radiale Verzeichnung optimieren“ erreicht. Erstere hat jedoch einen Neuentwurf des Beleuchtungssystems zur Folge, weshalb dieser Ansatz verworfen wird. Eine Optimierung der homogenen Beleuchtungsstrategie, mit dem Ziel die Überbeleuchtung der aktiven Modulatorfläche zu reduzieren und den Wirkungsgrad der Sammellinse zu steigern, wird nicht zu einer Beleuchtungsstärke von 120 lx in HV führen. Als Maßnahme zur Erreichung der Optimierungsziele wird daher die Optimierung der radialen Verzeichnung gewählt.

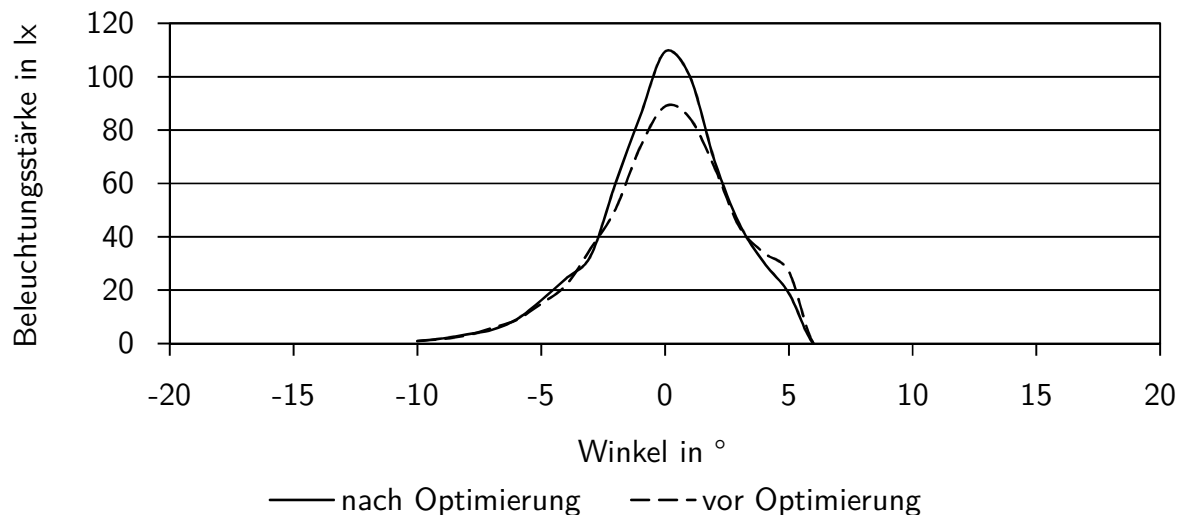
Auf Grundlage der identifizierten Maßnahme wird in den Entwurfsprozess zurückgekehrt und der sequentielle Entwurf des Projektionssystems durch anpassen der Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen sowie der *Merit Function* optimiert. Anschließend erfolgt eine erneute Wirkungsgradbewertung der verschiedenen Lichtverteilungen des nicht-sequentuellen DMD-Scheinwerferentwurfs.

6.3.2 Ergebnisse der Optimierung

Durch die Optimierung des Projektionssystems wird eine signifikante Erhöhung der Beleuchtungsstärke in HV erreicht. In Abbildung 6.23 ist ein horizontaler Schnitt (a) und ein vertikaler Schnitt (b) bei 0° durch die Beleuchtungsstärkeverteilung des Fernlichts vor und nach der Optimierung gegenübergestellt. Die Beleuchtungsstärke in HV wird um 29,2 % von 89 lx auf 115 lx gesteigert. Darüber hinaus erfolgt in dem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ ein Lichtstromzuwachs um 4,8 % von 1.208 lm auf 1.266 lm, welches durch eine effizientere radiale Verzeichnung erzielt wird. Die Verluste bei der radialen Verzeichnung werden von 21,3 % auf 17,5 % reduziert, welches annähernd den in Abschnitt 5.7 angenommenen 15 % entspricht jedoch geringer als die angestrebten 10 % aus Abschnitt 6.3.1 ist. Der Wirkungsgrad des Projektionssystems ist von 83,8 % auf 84,9 % und von der Fernlichtverteilung von 17,2 % auf 18,0 % gestiegen.



(a) Horizontaler Schnitt bei 0°



(b) Vertikaler Schnitt bei 0°

Abbildung 6.23: Schnitte durch die simulierte Fernlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers vor und nach der Optimierung

Bei der Abblendlichtverteilung wird mithilfe des optimierten Projektionssystems ebenfalls eine höhere Beleuchtungsstärke (109 lx) als vor der Optimierung (88 lx) erzeugt. Mit einem Lichtstromzuwachs von 6,7% in der Abblendlichtverteilung ist eine Wirkungsgradsteigerung von 9,8% auf 10,4% möglich. Darüber hinaus wird die Beleuchtungsstärke im Punkt B50L, welche maximal 0,5 lx betragen darf, von 0,43 lx auf 0,40 lx reduziert.

Die photometrischen Werte und Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilung vor und nach der Optimierung sind in Tabelle 6.6 aufgeführt. Die simulierten Lichtverteilungen für das Abblend- und Fernlicht mit und ohne Symbolprojektion können dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 6.6: Photometrische Werte und Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilungen vor und nach der Optimierung

	vor Optimierung		nach Optimierung	
	Fernlicht- verteilung	Abblendlicht- verteilung	Fernlicht- verteilung	Abblendlicht- verteilung
Lichtstrom in lm	1.208	686	1.266	732
E_{Max} in lx	89	88	115	109
E_{B50L} in lx	-/-	0,43	-/-	0,4
Wirkungsgrad η_L in %	17,2	9,8	18,0	10,4

In einer zweiten Optimierungsschleife, in der die homogene Beleuchtungsstrategie auf Grundlage der in Abschnitt 6.3.1 diskutierten Wirkungsgraderhöhung der Sammellinse und Reduktion der Überbeleuchtung optimiert wird, können die geforderten 1.400 lm und 120 lx erreicht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel erfolgt zunächst eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit. Die Eignung der Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme und die Applikabilität für andere Lichtsysteme werden im Rahmen der kritischen Würdigung diskutiert. Im Ausblick wird der Ansatz einer hybriden Strahlverfolgung zum Entwerfen optischer Systeme präsentiert und die Integration des in dieser Arbeit entworfenen DMD-Scheinwerfers in den Versuchsträger aus Kapitel 1 diskutiert.

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme vorgestellt und am Beispiel eines DMD-Scheinwerfers angewandt. Einleitend in diese Thematik erfolgt in Kapitel 1 zunächst eine Einführung in hochauflösende Lichtsysteme für die Fahrzeugfrontbeleuchtung. In Kapitel 2 wird der Stand der Wissenschaft in der Beleuchtungstechnik (Abschnitt 2.1), zum Entwerfen optischer Systeme (Abschnitt 2.2) sowie von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hochauflösender DMD-Scheinwerfer (Abschnitt 2.3.2) vermittelt. Dabei werden in Abschnitt 2.1 unter anderem die Eigenschaften und Funktionsweise der DMD-Technologie zur Lichtmodulation und LED-Technologie zur Lichterzeugung erläutert. Das Entwerfen optischer Systeme mithilfe der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung sowie die Entwurfsmethoden nach KINGSLAKE [KING10], MALACARA-HERNÁNDEZ ET AL. [MALA18], FISCHER [FISC08], VELZEL [VELZ14] und GROSS [GROS07] werden in Abschnitt 2.2 erläutert. In Abschnitt 2.3.2 werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hochauflösender DMD-Scheinwerfer unter anderem hinsichtlich des eingesetzten DMDs, der Lichtquelle sowie dem Lichtstrom und dem Wirkungsgrad der Abblend- und Fernlichtverteilung analysiert.

In Kapitel 3 werden zunächst Kriterien aufgestellt, die von einer Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme erfüllt werden müssen. Auf Grundlage dieser Kriterien erfolgt

eine Bewertung der Entwurfsmethoden aus dem Stand der Wissenschaft, wodurch die wissenschaftlichen Herausforderungen offengelegt und in drei Forschungsfragen formuliert werden.

In Kapitel 4 werden Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme hergeleitet. Dabei wird in Abschnitt 4.1 zunächst die Frage hinsichtlich der Schritte zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme und deren methodische Beschreibung adressiert. So erfolgt im ersten Schritt die Definition von Anforderungen an das hochauflösende Lichtsystem, die in einer Anforderungsliste festgehalten werden. Die Technologie zur Lichtmodulation, die Anzahl einzusetzender Lichtmodulatoren und die erforderliche Größe der aktiven Modulatorfläche werden im nächsten Schritt festgelegt. Für die Lichterzeugung werden im dritten Schritt die Technologie und auf Basis eines Étenduevergleichs zwischen Lichtmodulator und Lichtquelle die Anzahl einzusetzender Lichtquellen und die Größe der Emissionsfläche(n) spezifiziert. Die räumliche Anordnung der strahlformenden und -ablenkenden optischen Elemente zur Beleuchtung des Lichtmodulators und zur Projektion in den Anwendungsbereich werden in dem Konzipierungsschritt „Systemarchitektur determinieren“ festgelegt. Im fünften Schritt wird die Strategie zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche definiert, bei der primär zwischen abbildend und nichtabbildend und sekundär zwischen homogen und inhomogen differenziert werden kann. Für das optische System zur Projektion in den Anwendungsbereich wird im sechsten Schritt auf Grundlage der definierten Beleuchtungsstrategie die Verzeichnung bestimmt, um eine bedarfsgerechte Anpassung des Abbildungsmaßstabes herbeizuführen. Mithilfe eines sogenannten Lichtstrom- und Étenduefaktors erfolgt im vorletzten Schritt die Konzeptabsicherung. Der Konzipierungsprozess endet mit der Erstellung eines Strahlenmodells, welches als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf des hochauflösenden Lichtsystems verwendet wird.

In Abschnitt 4.2 erfolgt unter Berücksichtigung der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung die methodische Beschreibung des Entwurfsprozesses für hochauflösende Lichtsysteme, wodurch die zweite Forschungsfrage beantwortet wird. Für den sequentiellen Entwurf werden zunächst die Emissionscharakteristik und -fläche der Lichtquelle definiert. Im zweiten Schritt erfolgt auf Grundlage des Strahlenmodells das Festlegen von Funktionsflächen und Parametern, die während der Optimierung verändert werden dürfen. Entwurfsziele, die im Rahmen der Optimierung eingehalten bzw. erreicht werden sollen, werden im dritten Schritt der Methode in einer *Merit Function* festgehalten. Im Optimierungsschritt werden die Art, der Algorithmus und die Zyklenanzahl für die Optimierung festgelegt und eine Optimierung durchgeführt. Für abbildende optische Systeme erfolgt nach der Optimierung die Bewertung der Abbildungsqualität des sequentiellen Entwurfs. Optional kann der Einfluss fertigungs- und ausrichtungsbedingter Abweichungen auf die Abbildungsqualität durch die Zuweisung von Toleranzen erfolgen.

Für den Erhalt realitätsnaher Aussagen im Hinblick auf den Wirkungsgrad des optischen Systems sowie auftretender Streu- und Reflexionsstrahlung erfolgt der Aufbau eines nicht-sequentiellen Entwurfs. Hierfür wird im ersten Schritt die Lichtquelle unter Verwendung einer Strahldatei oder durch parametrische Modellierung mit entsprechender Winkel- und Ortsauflösung der Lichtstärke gemäß dem Datenblatt aufgebaut. Weiterhin werden aus den Funktionsflächen des sequentiellen Entwurfs optische Volumenelemente wie Linsen oder Prismen generiert und Material-, Beschichtungs- und Streuungsdefinitionen zugewiesen. Auf Grundlage der anschließenden Strahlverfolgung werden die Wirkungsgrade der einzelnen optischen Elemente und der Lichtverteilung(en) bestimmt. Wird im Rahmen der Wirkungsgradbewertung keine Beeinträchtigung infolge von Streu- und Reflexionsstrahlung ermittelt, kann der Schritt „Streulichtquellen identifizieren“ übersprungen werden und die Entwurfsmethode endet.

Mithilfe der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme wird in Kapitel 5 ein hochauflösender Scheinwerfer für die Fahrzeugfrontbeleuchtung konzipiert. Die Definition von Anforderungen erfolgt unter anderem im Hinblick auf lichttechnische und technologische Anforderungen. Für die Fernlichtverteilung wird in einem FOV von $40^\circ \times 15^\circ$ ein Lichtstrom von 1.400 lm und eine Beleuchtungsstärke von 120 lx in HV gefordert. Die Lichtmodulation soll mithilfe der DMD-Technologie und die Lichterzeugung mithilfe der LED-Technologie umgesetzt werden. Für die Lichtmodulation werden in Abschnitt 5.2 Multichip- und Einzelchip-Konzepte zur Umsetzung des DMD-Scheinwerfers diskutiert und auf Grundlage von Bewertungskriterien das Einzelchip-Konzept unter Verwendung des DLP7000 ausgewählt.

Zur Beleuchtung des DLP7000 erfolgt in Abschnitt 5.3 die Konzipierung hochlumiger Weißlichtquellen auf Basis der additiven Farbmischung und Lumineszenzkonversion. Als Konzept wird ein 2×4 LED-Array unter Verwendung der Osram Oslon[®] HL LED gewählt. Die Systemarchitektur wird in Abschnitt 5.4 im Hinblick auf die Ausnutzung der Étendue, der kompakten Anordnung und der geringen Systemkomplexität zu einer telezentrischen Architektur unter Verwendung eines TIR-Prismas bestimmt. Mit einer nichtabbildenden homogenen Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche erfolgt in Abschnitt 5.5 die Festlegung der Beleuchtungsstrategie, auf die in Abschnitt 5.6 eine radiale Verzeichnung für das optische System zur Projektion in den Verkehrsraum abgestimmt wird. Die Konzeptabsicherung erfolgt in Abschnitt 5.7 durch die Ermittlung des Lichtstrom- und Étenduefaktors und der Erstellung eines Strahlenmodells des konzipierten DMD-Scheinwerfers.

Auf Basis des Strahlenmodells erfolgt in Kapitel 6 entsprechend der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme der Entwurf des konzipierten DMD-Scheinwerfers. Das optische System zur Beleuchtung der aktiven Modulatorfläche wird dabei im Rahmen der sequentiellen Strahlverfolgung mithilfe eines Dreilinsensystems zur Formung der von der Lichtquelle

emittierten Strahlen und einem TIR-Prisma zur Strahlablenkung auf die aktive Modulatorfläche entworfen. Für das am IPeG entwickelte Projektionssystem zur radial verzeichnenden Abbildung in den Verkehrsraum erfolgt eine Bewertung der Abbildungsqualität mithilfe des RMS-Punktradius.

Der vollständige Entwurf des DMD-Scheinwerfers wird im Rahmen der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung durch die Modellierung der aktiven Modulatorfläche und das Zusammenführen des Beleuchtungs- und Projektionssystems erreicht. In Abschnitt 6.2.2 werden die Wirkungsgrade der einzelnen optischen Elemente des vollständigen DMD-Scheinwerferentwurfs und die Wirkungsgrade der Abblend- und Fernlichtverteilung mit und ohne Symbolprojektion analysiert. Mit einem Wirkungsgrad von 9,8 % für die Abblendlichtverteilung und 17,2 % für die Fernlichtverteilung werden die Anforderungen an den Wirkungsgrad der jeweiligen Lichtverteilung erfüllt. Die Anforderungen hinsichtlich des Lichtstroms (1.400 lm) und der Beleuchtungsstärke in HV (120 lx) werden von der Fernlichtverteilung mit 1.208 lm und 89 lx jedoch nicht erfüllt.

Auf Basis der ermittelten Wirkungsgrade erfolgt in Abschnitt 6.3 eine Optimierungsschleife, in der zunächst Maßnahmen zur Erhöhung des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke diskutiert werden. Anschließend erfolgt eine Optimierung des Projektionssystems, wodurch der Lichtstrom in der Fernlichtverteilung auf 1.266 lm und die Beleuchtungsstärke in HV auf 115 lx gesteigert wird.

Mithilfe der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme wird in Kapitel 5 ein DMD-Scheinwerfer konzipiert und in Kapitel 6 unter Zuhilfenahme der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme entworfen, sodass auch die dritte Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet wird.

7.2 Kritische Würdigung

In dieser Arbeit sind, für hochauflösende Lichtsysteme bei denen ein Lichtmodulator eingesetzt wird, Methoden zum Konzipieren und Entwerfen erarbeitet worden. Durch die Methode zum Konzipieren wird ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen zur Generierung von Konzepten für hochauflösende Lichtsysteme bereitgestellt, um diese als Grundlage für den nachfolgenden Entwurf zu nutzen. Die einzelnen Schritte zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme werden unter Berücksichtigung der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung methodisch beschrieben. Neben Kriterien zur Bewertung der Abbildungsqualität wird zusätzlich der Wirkungsgrad zur Bewertung des Entwurfs herangezogen. Über Schleifen innerhalb der

Methoden können im Rahmen der Konzipierungs- und Entwurfsphase Anpassungen und Optimierungen vorgenommen werden. Die in Kapitel 3 aufgestellten Kriterien an die Methoden werden somit erfüllt.

Wenngleich die aufgestellten Kriterien erfüllt werden, sind im Rahmen der Wirkungsgradanalyse des nicht-sequentiellen DMD-Scheinwerferentwurfs (Abschnitt 6.2.2) Limitationen bei der Methode zum Entwerfen identifiziert worden. Aufgeteilt in Schritte für den sequentiellen Entwurf und in Schritte für den nicht-sequentiellen Entwurf entsteht in der Methode ein Bereich der undefiniert ist. Im Rahmen des Entwurfsprozesses für den DMD-Scheinwerfer wird dieser undefinierte Bereich zweimal durchlaufen. Einmal beim Entwerfen der Sammellinse und einmal während des unabhängigen Entwurfs von Beleuchtungs- und Projektionssystem. Im nicht-sequentiellen Entwurf des vollständigen DMD-Scheinwerfers werden an der Sammellinse und am TIR-Prisma zwischen Beleuchtungs- und Projektionssystem die höchsten Lichtstromverluste ermittelt. Ein Ansatz dieser Herausforderung zu begegnen wird im Rahmen des Ausblicks vorgestellt.

Abseits der DMD-Technologie ist für die Umsetzung hochauflösender Lichtsysteme der Einsatz weiterer Technologien (LCD, LCoS, etc.) möglich. Die Anwendbarkeit der Methoden zum Konzipieren und Entwerfen werden im Folgenden am Beispiel verschiedene Lichtsysteme, die im Rahmen von Forschungsarbeiten am IPeG entstanden sind, diskutiert.

Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung [KLOP17]

In dieser Forschungsarbeit erfolgt die Entwicklung einer Projektionseinheit zur Darstellung farbiger Informationen vor dem Fahrzeug. Für die Lichtmodulation wird ein 2D-Microscanner und zur Lichterzeugung eine RGB-Laserlichtquelle verwendet.

Laser high-resolution vehicle headlamps [LI20]

Unter Verwendung der LCoS-Technologie zur Lichtmodulation wird in dieser Forschungsarbeit ein hochauflösender Scheinwerfer für die Fahrzeugfrontbeleuchtung entwickelt. Für die Lichterzeugung wird eine RGB-Laserlichtquelle eingesetzt. Die aktive Modulatorfläche wird homogen beleuchtet und über ein anamorphotisch verzeichnendes Projektionssystem in den Verkehrsraum abgebildet.

Für beide Lichtsysteme müssen im Rahmen der Konzipierung die gleichen Schritte durchlaufen werden wie bei einem DMD-Scheinwerfer, sodass die Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme uneingeschränkt angewendet werden kann. Auch das Vorgehen zum Entwerfen ist vergleichbar, sodass die Methode zum Entwerfen ebenfalls uneingeschränkt verwendet werden kann.

Werden einzelne Schritte innerhalb der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme angepasst, so besteht darüber hinaus die Möglichkeit Lichtsysteme ohne Lichtmodulator zu konzipieren. Für die nachfolgende Forschungsarbeit kann das Lichtsystem durch überspringen der Schritte „Lichtmodulator festlegen“ und „Beleuchtungsstrategie definieren“ konzipiert werden. Das methodische Vorgehen zum Entwerfen des Lichtsystems lässt sich unverändert übernehmen.

Hochauflösende LED-Scheinwerfer für Kraftfahrzeuge [HELD20]

Unter Verwendung von Mikropixel LED-Arrays zur Lichterzeugung wird in dieser Forschungsarbeit ein Scheinwerfer mit 3.072 Pixeln entwickelt. Für die Ausleuchtung des Verkehrsraums wird ein Projektionssystem mit anamorphotischer Verzeichnung entworfen.

Die Anwendbarkeit beider Methoden wird durch Lichtsysteme mit beleuchtendem Charakter bei denen kein Lichtmodulator eingesetzt wird und deren Systemarchitektur deutlich von den in Abschnitt 5.4 vorgestellten abweicht, limitiert. So ist die Konzipierung des Lichtsystems der nachfolgenden Forschungsarbeit nicht mithilfe der Methode zum Konzipieren hochauflösender Lichtsysteme möglich. Auch die Methode zum Entwerfen ist nur sehr eingeschränkt anwendbar, da der Entwurf facettierter Elemente wie Reflektoren primär nicht-sequentiell (vgl. Abschnitt 2.2.1, Tabelle 2.3) erfolgt.

Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge [WOLF17a]

In dieser Arbeit erfolgt die Entwicklung eines Zusatzfernlichtes für Kraftfahrzeuge. Die Lichterzeugung erfolgt auf Basis der Lumineszenzkonversion, in dem durch eine blaue Laserlichtquelle ein Leuchtstoff angeregt wird. Als optisches Element zur Strahlformung in den Verkehrsraum wird ein Reflektor verwendet.

7.3 Ausblick

Auf Grundlage dieser Arbeit lässt sich eine Vielzahl weiterer Forschungsfelder ableiten, von denen im Folgenden drei genauer betrachtet werden. Wie bereits in Abschnitt 7.2 kritisch betrachtet, hat der undefinierte Übergang zwischen dem sequentiellen und nicht-sequentiellen Entwurf in der Methode zum Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme zur Folge, dass zum Teil optische Elemente mit geringem Wirkungsgrad entworfen werden. Eine zielgerichtete Wirkungsgradoptimierung im Rahmen des Entwurfsprozesses ist daher wünschenswert. Erreicht werden kann dies durch die Kopplung der sequentiellen und nicht-sequentiellen Strahlverfolgung zu einer hybriden Strahlverfolgung (nicht zu verwechseln mit der weitverbreiteten

Kombination von Strahlverfolgung und Rasterung im Bereich der Computervisualistik). Die Grundidee der hybriden Strahlverfolgung ist eine schrittweise Optimierung des Entwurfs mithilfe der sequentiellen Strahlverfolgung auf Grundlage des ermittelten Wirkungsgrads im Rahmen der nicht-sequentiellen Strahlverfolgung [LEY20a]. Hierfür wird der Wirkungsgrad des nicht-sequentiellen Entwurfs als zusätzliches Optimierungskriterium in der *Merit Function* für den sequentiellen Entwurf berücksichtigt. Hierzu sind bereits erste Untersuchungen erfolgt, in denen das Konzept zur Umsetzung und ein Vergleich zwischen dem konventionellen Entwurfsprozess und einem Entwurfsprozess mithilfe der hybriden Strahlverfolgung untersucht wurden [LEY19a, LEY20a, LEY20b].

In Bezug auf die Übertragbarkeit der Methoden zum Konzipieren und Entwerfen hochauflösender Lichtsysteme sind ebenfalls im Rahmen der kritischen Würdigung Grenzen aufgezeigt worden. Damit die Methode zum Konzipieren auch für andere Lichtsysteme eingesetzt werden kann, ist diese um spezifische Schritte zu erweitern. So bietet es sich an nach dem Konzipierungsschritt „Anforderungen definieren“ einen Entscheidungsknoten einzufügen, sodass der Einsatz eines Lichtmodulators in dem zu konzipierenden Lichtsystem abgefragt wird. Für Lichtsysteme in denen kein Lichtmodulator eingesetzt werden soll, können im Rahmen einer neuen Verzweigung zusätzliche Konzipierungsschritte innerhalb der Methode vorgesehen werden. Für Lichtsysteme die primär nicht-sequentiell entworfen werden wie der Reflektor in der Arbeit von WOLF [WOLF17a] ist das Vorgehen für den nicht-sequentiellen Entwurf um die Schritt „Funktionsflächen, Parameter und Randbedingungen festlegen“, „*Merit Function* erstellen“ sowie den Optimierungsschritt zu erweitern. Weiterhin würde sich zu Beginn des Entwurfsprozesses eine Abfrage im Hinblick auf das zu entwerfende Lichtsystem anbieten, in der zunächst geklärt wird, ob ein sequentieller und/oder nicht-sequentieller Entwurf geeignet ist.

Wie bereits in Kapitel 1 ausgeführt, werden sowohl am IPeG [LACH17, RIZV17, RIZV18] als auch an anderen Institutionen [JAHN17, ROSE19, BUDA19a, BUDA19b, KRIE19] Untersuchungen im Hinblick auf die Akzeptanz und Wahrnehmbarkeit sowie die Größe von Symbolprojektionen im Verkehrsraum untersucht. Eine weiterführende Fragestellung ist die Auswirkung von Pixelfehlern in Lichtverteilungen bzw. Symbolprojektionen. Durch die Realisierung des konzipierten und entworfenen DMD-Scheinwerfers mit anschließender Integration in den Versuchsträger aus Kapitel 1 besteht die Möglichkeit diese Fragestellung zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [BAER16] BAER, Roland (Hrsg.); BARFUSS, Meike (Hrsg.); SEIFERT, Dirk (Hrsg.): *Beleuchtungstechnik*. 4. Auflage. Berlin: Huss-Medien GmbH, 2016. – ISBN 978-3-341-01634-3.
- [BASS95] BASS, Michael (Hrsg.): *Handbook of optics*. 2. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1995. – ISBN 978-0-07-047740-7.
- [BERL14] BERLITZ, Stephan; HAMM, Michael; FUNK, Christian: Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (2014), Nr. 3, S. 10–15. – ISSN 0001-2785.
- [BEYE16] BEYERER, Jürgen; PUENTE LEÓN, Fernando; FRESE, Christian: *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. 2., erweiterte und verbesserte Auflage. Berlin and Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. – ISBN 978-3-662-47785-4.
- [BHAK15] BHAKTA, Vikrant R.; BALLARD, Brian: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015*. [München]: [Utz], 2015 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 483–494.
- [BÖKE15] BÖKE, Björn; MAIER, Markus; MOISEL, Jörg; HEROLD, Florian: The Mercedes-Benz Headlamp of the Future: Higher Resolution with Greater Intelligence for Enhanced Safety. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015*. [München]: [Utz], 2015 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 49–58.
- [BONE16] BONENBERGER, Theresa: *LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016.
- [BRAE05] BRAESS, Hans-Hermann (Hrsg.); SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik: Mit 91 Tabellen*. 4., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2005 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 3-528-33114-3.

- [BRAU05] BRAUN, Thomas E.: *Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2005*. München, Dissertation, 2005.
- [BREC16] BRECHER, Christian; BAUM, Christoph; MEIERS, Bernd; DE SIMONE, Daniel; KRAPPIG, Reik: *Kunststoffkomponenten für LED-Beleuchtungsanwendungen: Werkzeugtechnik, Replikation und Metrologie*. 1. Aufl. 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. – ISBN 978–3–658–12249–2.
- [BUDA19a] BUDANOW, Marina; NEUMANN, Cornelius: Road projections as a new and intuitively understandable human-machine interface. In: *Advanced Optical Technologies* 8 (2019), Nr. 1, S. 77–84. – ISSN 2192–8576.
- [BUDA19b] BUDANOW, Marina; NEUMANN, Cornelius: Success of Driver Assistance through Light Projections on the Road. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *13th International Symposium on Automotive Lightning - ISAL 2019*. [München]: [Utz], 2019 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978–3–8316–4818–4, S. 311–319.
- [CHAV08] CHAVES, Julio: *Optical science and engineering (Boca Raton, Florida)*. Bd. 134: *Introduction to nonimaging optics*. Boca Raton, Florida and London: CRC Press and Taylor & Francis Group, 2008. – ISBN 978–1–4200–5429–3.
- [CHEN16] CHEN, Janglin (Hrsg.); CRANTON, Wayne (Hrsg.); FIHN, Mark (Hrsg.): *Handbook of Visual Display Technology*. 2. ed. Cham: Springer, 2016. – ISBN 978–3–319–14345–3.
- [CHO17] CHO, Jaehee; PARK, Jun H.; KIM, Jong K.; SCHUBERT, E. F.: White light-emitting diodes: History, progress, and future. In: *Laser & Photonics Reviews* 11 (2017), Nr. 2, S. 1600147. – ISSN 18638880.
- [CONS71] CONSITT, F.J.P.; MANDLER, W.: OTF Techniques in the Routine Testing of Production Lenses. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 18 (1971), Nr. 2, S. 123–131. – ISSN 0030–3909.
- [CREE20] CREE, INC.: *Cree® XLamp® XM-L® Color: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://cree-led.com/media/documents/XLampXML_Color.pdf, abgerufen am 23.06.2020. 2020.
- [DEWA03] DEWALD, D. S.; SEGLER, D. J.; PENN, Steven M.: Advances in contrast enhancement for DLP projection displays. In: *Journal of the Society for Information Display* 11 (2003), Nr. 1, S. 177. – ISSN 10710922.

- [DOUG03] DOUGLASS, Michael: DMD reliability: a MEMS success story. In: RAMESHAM, Rajeshuni (Hrsg.); TANNER, Danelle M. (Hrsg.): *Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II*, SPIE, 2003 (SPIE Proceedings), S. 1.
- [DRUD07] DRUDE, Paul: *Lehrbuch der Optik*. Unveränd. Aufl. ; repr. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2007 (Edition Classic). – ISBN 9783836436700.
- [DUFF99] DUFFY, Alex H.; O.DONNELL, F.J.: A Design Research Approach. In: MORTENSEN, Niels H. (Hrsg.); SIGURJONSSON, Johannes (Hrsg.): *Critical enthusiasm*. Trondheim: Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet, 1999. – ISBN 82-91917-08-6, S. 33-40.
- [ENDE01] ENDERS, Martin: Pixel Light. In: SCHMIDT-CLAUSEN, Hans-Joachim (Hrsg.): *Progress in Automobile Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2001 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 3-89675-971-X.
- [ESTE08] ESTEFAN, Jeff: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. In: *INCOSE MBSE Focus Group 25* (2008), 01.
- [FISC08] FISCHER, Robert E.; TADIC-GALEB, Biljana; GALEB, Biljana T.; YODER, Paul R.: *Optical system design*. 2. ed. New York NY u.a.: McGraw-Hill, 2008. – ISBN 9780819467850.
- [FLOR96] FLORENCE, James M.; YODER, Lars A.: Display system architectures for digital micromirror device (DMD)-based projectors. In: WU, Ming H. (Hrsg.): *Projection Displays II*, SPIE, 1996 (SPIE Proceedings), S. 193-208.
- [FLÜG67] FLÜGGE, S.: *Handbuch der Physik / Encyclopedia of Physics*. Bd. 5 / 29: *Optische Instrumente / Optical Instruments*. Berlin and Heidelberg: Springer, 1967. – ISBN 978-3-642-46078-4.
- [FOUR08] FOURNIER, F.; ROLLAND, J.: Design Methodology for High Brightness Projectors. In: *Journal of Display Technology* 4 (2008), Nr. 1, S. 86-91. – ISSN 1551-319X.
- [GERH16] GERHARD, Christoph: *Tutorium Optik: Ein verständlicher Überblick für Physiker, Ingenieure und Techniker*. Berlin and Heidelberg: Springer Spektrum, 2016. – ISBN 978-3-662-48574-3.
- [GORR15] GORROTXATEGI, Paula; CONSONNI, Marianne; GASSE, Adrien: Optical efficiency characterization of LED phosphors using a double integrating sphere system. In: *Journal of Solid State Lighting* 2 (2015), Nr. 1.

- [GRAM27] GRAMMEL, Richard (Hrsg.); GEIGER, Hans (Hrsg.): *Handbuch der Physik*. Bd. / unter redaktioneller Mitwirkung von R. Grammel - Stuttgart und 5 weiteren ; herausgegeben von H. Geiger und Karl Scheel ; Band 18: *Geometrische Optik, optische Konstante, optische Instrumente*. Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1927. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1927. – ISBN 978–3–642–88926–4.
- [GRIM88] GRIMSEHL, Ernst; HAFERKORN, Heinz: *Lehrbuch der Physik*. Bd. / begr. von Ernst Grimsehl ; Bd. 3: *Optik*. 19. Aufl. Leipzig: Teubner, 1988. – ISBN 978–3–322–96432–8.
- [GROS07] GROSS, Herbert; ZÜGGE, Hannfried; PESCHKA, Martin; BLECHINGER, Fritz: *Handbook of optical systems*. Bd. 3: *Aberration theory and correction of optical systems*. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. – ISBN 978–3–527–40379–0.
- [GRÖT15] GRÖTSCH, Stefan; PFEUFFER, Alexander; LIEBETRAU, Thomas; OPPERMANN, Hermann; BRINK, Morten; FIEDERLING, Roland; MÖLLERS, Ingo; MOISEL, Jörg: Integrated High Resolution LED Light Sources in an AFS/ADB Headlamp. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015*. [München]: [Utz], 2015 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 241–250.
- [GÜNT10] GÜNTHER, Alexander: *Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2010.
- [GUT14] GUT, Charsten; ROTSCHOLL, Ingo; NEUMANN, Cornelius: Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme. In: VDI (Hrsg.): *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2221. Düsseldorf: VDI-Verl., 2014. – ISBN 978–3–18–092221–8, S. 15–29.
- [GUT17] GUT, Carsten: *Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2017.
- [HAFE03] HAFERKORN, Heinz: *Optik: Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. 4., bearb. und erw. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. – ISBN 3–527–40372–8.
- [HANS19] HANSEN, Julien: *Remote-Laser-Lichtquelle für ein hochaufgelöstes Scheinwerfer-system*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2019.

- [HELD20] HELD, Marcel P.: *Hochauflösende LED-Scheinwerfer für Kraftfahrzeuge*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2020.
- [HERI06] HERING, Ekbert; MARTIN, Rolf: *Photonik: Grundlagen, Technologie und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – ISBN 3-540-23438-1.
- [HERI17a] HERING, Ekbert (Hrsg.); BRESSLER, Klaus (Hrsg.); GUTEKUNST, Jürgen (Hrsg.): *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 7., aktualisierte und verbesserte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. – ISBN 978-3-662-54213-2.
- [HERI17b] HERING, Ekbert (Hrsg.); MARTIN, Rolf (Hrsg.): *Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Grundlagen und Anwendungen*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017. – ISBN 978-3-446-44281-8.
- [HESS15] HESSE, Henrik: BMBF-Project VOLIFA 2020 - High resolution light distribution by using a LCD. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015*. [München]: [Utz], 2015 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 495-502.
- [HEUC13] HEUCK, Klaus; DETTMANN, Klaus-Dieter; SCHULZ, Detlef: *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. 9., aktualisierte und korrigierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013 (Lehrbuch). – ISBN 978-3-8348-1699-3.
- [HORN96] HORNBECK, Larry J.: Digital Light Processing and MEMS: reflecting the digital display needs of the networked society. In: PARRIAUX, Olivier M. (Hrsg.): *Micro-Optical Technologies for Measurement, Sensors, and Microsystems*, SPIE, 1996 (SPIE Proceedings), S. 2-13.
- [HORN99] HORNBECK, Larry J.: Digital Light Processing update: status and future applications. In: WU, Ming H. (Hrsg.): *Projection Displays V*, SPIE, 1999 (SPIE Proceedings), S. 158-170.
- [HUAN10] HUANG, Ming-Shyan; HUNG, Chuan-Cheng; FANG, Yi-Chin; LAI, Wei-Chi; CHEN, Yi-Liang: Optical design and optimization of light emitting diode automotive head light with digital micromirror device light emitting diode. In: *Optik* 121 (2010), Nr. 10, S. 944-952. – ISSN 00304026.
- [HUAN14] HUANG, Yung-Chih; PAN, Jui-Wen: High contrast ratio and compact-sized prism for DLP projection system. In: *Optics express* 22 (2014), Nr. 14, S. 17016-17029.

- [JAHN17] JAHN, Patric; CRISTEA, Iulia; NEUMANN, Cornelius: High-Resolution Light-Based Driver-Assistance – Optimal Contrast for Symbols. In: TRAN QUOC KHANH (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017 (International Symposium on Automotive Lighting; Herbert Utz Verlag GmbH; ISAL). – ISBN 978-3-8316-4671-5, S. 43–52.
- [JIAN12] JIAN, Yi; PAN, Zhaoxin: A field lens design of illumination and projection optics for dynamic infrared scene generator based on DMD. In: YE, Tianchun (Hrsg.); HU, Song (Hrsg.); LI, Yanqiu (Hrsg.); LUO, Xiangang (Hrsg.); BAO, Xiaoyi (Hrsg.): *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Smart Structures, Micro- and Nano-Optical Devices, and Systems*, SPIE, 2012 (SPIE Proceedings), S. 84180N.
- [KALZ16] KALZE, Franz-Josef; KNAACK, Ulrich-Christian; BÖKE, Björn: Mehrzeiliges Scheinwerfersystem in der Mercedes-Benz E-Klasse. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118 (2016), Nr. 2, S. 16–23. – ISSN 0001-2785.
- [KAUS06] KAUSCHKE, Rainer: *Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern*, Universität Paderborn, Dissertation, 2006.
- [KING10] KINGSLAKE, Rudolf; JOHNSON, R. B.: *Lens design fundamentals*. 2nd edition. London: Academic Press, 2010. – ISBN 978-0-12-374301-5.
- [KLOO07] KLOOS, Gerhard: *Entwurf und Auslegung optischer Reflektoren: Theorie und Anwendungen/ Gerhard Kloos*. Renningen: expert, 2007. – ISBN 978-3-8169-2644-3.
- [KLOP16] KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: High-resolution vehicle headlamps: technologies and scanning prototype. In: *Advanced Optical Technologies* 5 (2016), Nr. 2, S. 147–155.
- [KLOP17] KLOPPENBURG, Gerolf: *Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2017.
- [KNÖC18] KNÖCHELMANN, Marvin; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: Aktiver Scheinwerfer mit DMD-technologie zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2323, Düsseldorf : VDI-Verlag, 2018, S. 61–78.

- [KNÖC19] KNÖCHELMANN, Marvin; HELD, Marcel P.; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: High-resolution headlamps – technology analysis and system design. In: *Advanced Optical Technologies* 8 (2019), Nr. 1, S. 33–46.
- [KNÖC21] KNÖCHELMANN, Marvin: *Prozess zur Entwicklung optomechatronischer Systeme*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2021.
- [KÖHL19] KÖHLER, S.; FISCHER, B.; KLARIUS, A.: Imaging Optics for High-Resolution Headlamps. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *13th International Symposium on Automotive Lightning - ISAL 2019*. [München]: [Utz], 2019 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4818-4, S. 281–290.
- [KOND75] KONDO, Hideki; WATANABE, Toshio; YAMAOKA, Humio: Criteria for the Evaluation of Photographic Lenses. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 22 (1975), Nr. 4, S. 353–363. – ISSN 0030-3909.
- [KOSH13] KOSHEL, R. J.: *Illumination engineering: Design with nonimaging optics*. Hoboken, N.J. and Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 2013. – ISBN 978-0-4709-1140-2.
- [KRIE19] KRIEFT, Florian; THOMA, Aniella; WILLEKE, Benjamin; KUBITZA, Boris; KAUP, Marc: Symbol Projections: Gain or Gadget? In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *13th International Symposium on Automotive Lightning - ISAL 2019*. [München]: [Utz], 2019 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4818-4, S. 321–330.
- [KUBI18] KUBITZA, Boris; WILKS, Carsten: Digitales Licht als Unterstützung für den Fahrer. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 120 (2018), Nr. 4, S. 56–59. – ISSN 0001-2785.
- [KUNZ00] KUNZMAN, Adam; O’CONNOR, J.; SEGLER, D. J.; MIGL, T.; BELL, Kenneth T.: Advancing the DMD device for high-definition home entertainment. In: CHINNOCK, Christopher B. (Hrsg.): *Digital Cinema and Microdisplays*, SPIE, 2000 (SPIE Proceedings), S. 1.
- [KWOK00] KWOK, H. S.; CHENG, P. W.; HUANG, H. C.; LI, H. F.; ZHENG, Z. R.; GU, P. F.; LIU, X.: Trichroic prism assembly for separating and recombining colors in a compact projection display. In: *Applied optics* 39 (2000), Nr. 1, S. 168–172.
- [LACH14a] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf: Lichtmodule auf Basis von laseraktiviertem Leuchtstoff für den Einsatz als Zusatzfernlicht. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2221, Düsseldorf : VDI-Verlag, 2014, S. 31–44.

- [LACH14b] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf: System efficiency of laser-based white light. In: *Advanced Optical Technologies* 3 (2014), Nr. 5-6, S. 2221. – ISSN 2192–8576.
- [LACH15] LACHMAYER, Roland; KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander: Rapid prototyping of reflectors for vehicle lighting using laser activated remote phosphor. In: STREUBEL, Klaus P. (Hrsg.); JEON, Heonsu (Hrsg.); TU, Li-Wei (Hrsg.); STRASSBURG, Martin (Hrsg.): *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XIX*, SPIE, 2015 (SPIE Proceedings), S. 938305.
- [LAIK07] LAIKIN, Milton: *Optical science and engineering*. Bd. 122: *Lens design*. 4th edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. – ISBN 978–0–8493–8278–9.
- [LEE11] LEE, Taewon; PARK, Gunwoo; KIM, Hongseok; PARK, Inheum; KYUNGHOO, Lee.: The Development of the Automotive Headlamp using the DMD. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 14. München: Utz, 2011. – ISBN 978–3–8316–4093–5, S. 524–534.
- [LI05] LI, Kenneth; INATSUGU, Seiji: Etendue efficient coupling of an array of LEDs for projection display. In: WU, Ming H. (Hrsg.): *Projection Displays XI*, SPIE, 2005 (SPIE Proceedings), S. 36–40.
- [LI18] LI, Daoping; ZHENG, Jihong; YANG, Bo: Zoom projection lens design for small throw ratio and large field of view. In: *Journal of Modern Optics* 65 (2018), Nr. 15, S. 1827–1838. – ISSN 0950–0340.
- [LI20] LI, Yang: *Laser high-resolution vehicle headlamps*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2020.
- [LICH17] LICHTI, Markus; BART, Hans-Jörg: Partikelmesstechnik in der Fluidverfahrenstechnik. In: *Chemie Ingenieur Technik* 89 (2017), Nr. 12, S. 1599–1610. – ISSN 0009286X.
- [LIND09] LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 (VDI-Buch). – ISBN 978–3–642–01422–2.
- [LITF05] LITFIN, Gerd: *Technische Optik in der Praxis: Mit 20 Tabellen*. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2005 (SpringerLink: Springer e-Books). – ISBN 3–540–21884–X.

- [LÖFF12] LÖFFLER-MANG, Martin: *Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012. – ISBN 978–3–8348–8308–7.
- [LYNC09] LYNCH, Andrew; FOCKE, Kai: Strahlableitung: Prismen und Spiegel im Vergleich. In: *Photonik: Fachzeitschrift für die optischen Technologien* 41 (2009), Nr. 3, S. 51–54.
- [MAES08] MAES, Dirk L.: *Dual TIR Prism Architecture to enhance DLP Projectors*, WO2008155367A2, 2008.
- [MAIE15] MAIER, Markus; MOISEL, Jörg; HEROLD, Florian: Multibeam-Scheinwerfer in der Mercedes-Benz CLS-Klasse. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117 (2015), Nr. 2, S. 16–21. – ISSN 0001–2785.
- [MALA18] MALACARA-HERNÁNDEZ, Daniel (Hrsg.); THOMPSON, Brian J. (Hrsg.): *Fundamentals and basic optical instruments*. 2nd edition. Boca Raton and London and New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018 (Optical science and engineering). – ISBN 9781498720748.
- [McDo01] MCDOWALL, Ian E.; BOLAS, Mark T.; CORR, Dan; SCHMIDT, Terry C.: Single and multiple viewer stereo with DLP projectors. In: WOODS, Andrew J. (Hrsg.); BOLAS, Mark T. (Hrsg.); MERRITT, John O. (Hrsg.); BENTON, Stephen A. (Hrsg.): *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VIII*, SPIE, 2001 (SPIE Proceedings), S. 418–425.
- [MEIR65] MEIRON, Joseph: Damped Least-Squares Method for Automatic Lens Design. In: *Journal of the Optical Society of America* 55 (1965), Nr. 9, S. 1105. – ISSN 0030–3941.
- [MESC15] MESCHKE, Dieter: *Gerthsen Physik*. 25. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2015 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–662–45976–8.
- [MEUR03] MEURET, Youri: Contrast-improving methods for Digital Micromirror Device projectors. In: *Optical Engineering* 42 (2003), Nr. 3, S. 840. – ISSN 0091–3286.
- [MICH12] MICHEL, Bernhard; KRONEBERGER, Monika; HERMANN, Robert: Kopplung von Raytracern mit Spezialsoftware. In: *Photonik* 44 (2012), Nr. 3, S. 46–49.
- [MICH14] MICHENFELDER, Steffen: *Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2014.

- [MURA05] MURAT, Hueseyin; DE SMET, Herbert; CUYPERS, Dieter; MEURET, Youri; THIENPONT, Hugo; VERVAEKE, Michael; DESMET, Lieven: Increased lumens per etendue by combining pulsed LEDs. In: WU, Ming H. (Hrsg.): *Projection Displays XI*, SPIE, 2005 (SPIE Proceedings), S. 1–12.
- [NAUM14] NAUMANN, Helmut; SCHRÖDER, Gottfried; LÖFFLER-MANG, Martin: *Handbuch Bauelemente der Optik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. – ISBN 978–3–446–42625–2.
- [NICH21a] NICHIA CORPORATION: *PART NO. NC2W093BT: Datenblatt*. Online erhältlich unter: [http://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NC2W093BT-E\(5606B\).pdf](http://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NC2W093BT-E(5606B).pdf), abgerufen am 13.04.2021. 2021.
- [NICH21b] NICHIA CORPORATION: *PART NO. NC5W121DT: Datenblatt*. Online erhältlich unter: [http://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NC5W121DT-E\(5873A\).pdf](http://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NC5W121DT-E(5873A).pdf), abgerufen am 13.04.2021. 2021.
- [NICH21c] NICHIA CORPORATION: *PART NO. NCSW170DT-PCB: Datenblatt*. Online erhältlich unter: [https://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NCSW170DT-PCB-E\(5939\).pdf](https://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NCSW170DT-PCB-E(5939).pdf), abgerufen am 13.04.2021. 2021.
- [NICH21d] NICHIA CORPORATION: *PART NO. NJSW170DT: Datenblatt*. Online erhältlich unter: [http://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NJSW170DT-E\(5425C\)aswxbxexswx.pdf](http://www.nichia.co.jp/specification/products/led_spec/NJSW170DT-E(5425C)aswxbxexswx.pdf), abgerufen am 13.04.2021. 2021.
- [NOVA19] NOVAK, Matt; SYNOPSIS, INC. (Hrsg.): *Application in Optical Design: Optimization for Receiver Enclosed Energy in LiDAR Systems*. 2019.
- [OSRA19a] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSRAM OSTAR® Projection Power LE A P2W: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Projection%20Power%20LE%20A%20P2W/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2191169/, abgerufen am 14.06.2020. 2019.
- [OSRA19b] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSRAM OSTAR® Projection Power LE B P2W: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Projection%20Power%20LE%20B%20P2W/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2191175/, abgerufen am 14.06.2020. 2019.
- [OSRA20a] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSLON® Black Flat LUW H9GP.CE: Datenblatt*. Online erhältlich unter: <https://>

www.osram.com/ecat/OSLON%C2%AE%20Black%20LUW%20H9GP.CE/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190817/#62a1fdff42f13778e2055fdc87c50fcb, abgerufen am 22.03.2020. 2020.

[OSRA20b] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSLON® Black Flat LUW HWQP: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.osram.com/ecat/OSLON%C2%AE%20Black%20Flat%20LUW%20HWQP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2190825/, abgerufen am 22.03.2020. 2020.

[OSRA20c] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSLON® Black Flat S: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-6434532/KW%20HLL531.TE_EN.pdf, abgerufen am 13.04.2021. 2020.

[OSRA20d] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSLON® Boost HL: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-6480929/KW%20CULNM1.TG_EN.pdf, abgerufen am 13.04.2021. 2020.

[OSRA20e] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSRAM OSTAR® Projection Power LE CG P2A: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Projection%20Power%20LE%20CG%20P2A/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2191173/, abgerufen am 14.06.2020. 2020.

[OSRA20f] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSRAM OSTAR® Stage LE RTDUW S2WP: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Stage%20LE%20RTDUW%20S2WP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_2191218/#62a1fdff42f13778e2055fdc87c50fcb, abgerufen am 25.06.2020. 2020.

[OSRA21] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSLON® Boost HM: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5593568/KW%20CELMM1.TG_EN.pdf, abgerufen am 13.04.2021. 2021.

[PAN08] PAN, Jui-Wen; TU, Sheng-Han; WANG, Chih-Ming; CHANG, Jenq-Yang: High efficiency pocket-size projector with a compact projection lens and a light emitting

- diode-based light source system. In: *Applied optics* 47 (2008), Nr. 19, S. 3406–3414.
- [PATT18] PATTISON, Paul M.; HANSEN, Monica; TSAO, Jeffrey Y.: LED lighting efficacy: Status and directions. In: *Comptes Rendus Physique* 19 (2018), Nr. 3, S. 134–145. – ISSN 16310705.
- [PEDR05] PEDROTTI, Frank L.: *Optik für Ingenieure: Grundlagen ; mit 28 Tabellen.* 3., bearb. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer, 2005. – ISBN 978–3–540–22813–4.
- [PENN10] PENN, Steven M.: *Integrated TIR Prism and Lens*, US7817341B2, 2010.
- [REIF10] REIF, Konrad: *Batterien, Bordnetze und Vernetzung.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 978–3–8348–1310–7.
- [REIF11] REIF, Konrad: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme ; mit 43 Tab.* 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 978–3–8348–1274–2.
- [REIN17] REINERT-WEISS, Christiane J.; BAUR, Holger; NUSAYER, Sheikh Abdullah A.; DUHME, David; FRÜHAUF, Norbert: Development of active matrix LCD for use in high-resolution adaptive headlights. In: *Journal of the Society for Information Display* 25 (2017), Nr. 2, S. 90–97. – ISSN 10710922.
- [ROBI05] ROBINSON, Michael G.; SHARP, Gary D.; CHEN, Jianmin: *Polarization engineering for LCD projection.* Chichester, West Sussex, England and Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005 (Wiley SID series in display technology). – ISBN 978–0–470–87105–8.
- [ROEL10] ROELANDT, Stijn; BOGAERT, Lawrence; MEURET, Youri; AVCI, Aykut; DE SMET, Herbert; THIENPONT, Hugo: Color uniformity in compact LED illumination for DMD projectors. In: SCHELKENS, Peter (Hrsg.); EBRAHIMI, Touradj (Hrsg.); CRISTÓBAL, Gabriel (Hrsg.); TRUCHETET, Frédéric (Hrsg.); SAARIKKO, Pasi (Hrsg.): *Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications*, SPIE, 2010 (SPIE Proceedings), S. 77230X.
- [ROSE19] ROSENHAHN, E.-O.; LINK, F.: Traffic Safety Benefits provided by High Resolution Headlamp Systems. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *13th International Symposium*

- on Automotive Lightning - ISAL 2019*. [München]: [Utz], 2019 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4818-4, S. 239–248.
- [ROSL05] ROSLAK, Jacek: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*, Universität Paderborn, Dissertation, 2005.
- [ROST13] ROST, Manfred; WEFEL, Sandro: *Elektronik für Informatiker: Von den Grundlagen bis zur Mikrocontroller-Applikation*. München: Oldenbourg, 2013. – ISBN 978-3-486-70692-5.
- [ROTH19] ROTH, Joscha; THAMM, Mathias; HELD, Marcel P.; LACHMAYER, Roland: Micro-Pixel-LED-Headlights. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *13th International Symposium on Automotive Lightning - ISAL 2019*. [München]: [Utz], 2019 (Darmstädter Lichttechnik). – ISBN 978-3-8316-4818-4, S. 259–268.
- [ROTS16] ROTSCHELL, Ingo; TRAMPERT, Klaus; KRÜGER, Udo; PERNER, Martin; LEOPOLDO SAYANCA, Inca; SCHMIDT, Franz; NEUMANN, Cornelius: Bestimmung von winkel- und orts aufgelösten spektralen Rayfiles: Towards spatial and angular resolved spectral rayfiles. In: DEUTSCHEN LICHTTECHNISCHEN GESELLSCHAFT E. V. (Hrsg.): *LICHT 2016, Karlsruhe, 25. – 28. September*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2016. – ISBN 978-3-7315-0564-8, S. 671–678.
- [SASI19] SASIÁN, José: *Introduction to lens design*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – ISBN 9781108625388.
- [SCHL18] SCHLÖDER, Ulrike; ALBRECHT, Klaus F.: Headlamp DMD-Technology with High Resolution on the Road. In: SIA (Hrsg.): *SIA VISION Conference Proceedings*. 2018.
- [SCHM13] SCHMIDT, Ulrich: *Professionelle Videotechnik: Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D*. 6. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg and s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-38991-7.
- [SCHO14] SCHOTT AG: *Schott N-BK7®: Datenblatt*. Online erhältlich unter: <https://shop.schott.com/medias/schott-datasheet-n-bk7-eng.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8NjxODAwfGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnxoZTUvaDM4LzgzMTAzMTYxMDM3MTAucGRmfGJjNmI4ZjFmY2Q1NjMxMTE0MjkzMTUwOGRmMTUzOTg2NWJjZTgzMjA0OTc2NTNiMThjN2RhMjI4NGZmMWM4MjUWU>, abgerufen am 24.03.2021. 2014.

- [SCHÖ18] SCHÖNFELDER, Gert; HERING, Ekbert: *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978–3–658–12561–5.
- [SCHU98] SCHUHMAN, Rainer; THÖNISS, Thomas: Telezentrische Systeme für die optische Meß- und Prüftechnik. In: *tm - Technisches Messen* 65 (1998), Nr. 4. – ISSN 0171–8096.
- [SCHU18] SCHUBERT, E. F.: *Light-Emitting Diodes*. 3rd Edition. [S.l.]: E FRED SCHUBERT, 2018. – ISBN 978–0–9863826–6–6.
- [SCHW15] SCHWIRTEN, Tobias; CHEN, Nina: Grundprinzipien von SMD-LEDs. In: *FKT* 11 (2015), S. 503–506.
- [SEON13] SEONG, Tae-Yeon: *Topics in applied physics*. Bd. vol. 126: *III-nitride based light emitting diodes and applications*. Dordrecht: Springer, 2013. – ISBN 978–94–007–5862–9.
- [SMET11] SMET, Philippe F.; PARMENTIER, Anthony B.; POELMAN, Dirk: Selecting Conversion Phosphors for White Light-Emitting Diodes. In: *Journal of The Electrochemical Society* 158 (2011), Nr. 6, S. R37–R54. – ISSN 00134651.
- [SMIT00] SMITH, Warren J.: *Modern optical engineering: The design of optical systems*. 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 2000. – ISBN 0–07–136360–2.
- [SMIT05] SMITH, Warren J.: *Modern lens design*. 2nd edition. New York: McGraw-Hill, 2005. – ISBN 9780071438308.
- [STIN19] STINY, Leonhard: *Aktive elektronische Bauelemente: Aufbau, Struktur, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile*. 4., durchgesehene Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. – ISBN 978–3–658–24751–5.
- [STOL10] STOLZ, Oliver: *Differentielles Raytracing für spezielle Beleuchtungssysteme*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2010.
- [SUN11] SUN, Wen-Shing; CHIANG, Yen-Chen; TSUEI, Chih-Hsuan: Optical design for the DLP pocket projector using LED light source. In: *Physics Procedia* 19 (2011), S. 301–307. – ISSN 18753892.
- [SUN14] SUN, Wen-Shing; TIEN, Chuen-Lin; MA, Chao-Hui; PAN, Jui-Wen: Compact LED projector design with high uniformity and efficiency. In: *Applied optics* 53 (2014), Nr. 29, S. H227–32.

- [SUN17] SUN, Wen-Shing; PAN, Jui-Wen: Non-telecentric projection lens design for an LED projector. In: *Applied optics* 56 (2017), Nr. 3, S. 712–720.
- [TEXA10] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP™ System Optics: Application Report (DLPA022)*. Online erhältlich unter: https://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf?ts=1594124260708&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsitesearch%252Fdocs%252Funiversalsearch.tsp%253FsearchTerm%253Dapplication%2Bnote%2Bdlpa022, abgerufen am 28.02.2020. 2010.
- [TEXA19a] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP5531-Q1 0.55-Inch 1.3-Megapixel DMD for Automotive Exterior Lighting: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp5531-q1.pdf?ts=1594105949495&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.de%252F, abgerufen am 30.05.2020. 2019.
- [TEXA19b] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP660TE 0.66 4K UHD DMD: Datenblatt*. Online erhältlich unter: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp660te.pdf>, abgerufen am 08.04.2020. 2019.
- [TEXA19c] TEXAS INSTRUMENTS: *DLP7000 DLP® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD: Datenblatt*. Online erhältlich unter: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp7000.pdf?ts=1594106128767&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.de%252F, abgerufen am 30.05.2020. 2019.
- [TROM17] TROMMER, Jenny; FEIL, Thomas; WEISSENBERGER, Daniel; FIEDERLING, Roland; RAYER, Mathieu: New Possibilities with μ -AFS modules - The Path to High-Resolution Full-Matrix Headlamps. In: TRAN QUOC KHANH (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017 (International Symposium on Automotive Lighting; Herbert Utz Verlag GmbH; ISAL). – ISBN 978–3–8316–4671–5, S. 333–341.
- [TSAI11] TSAI, Cheng-Mu; FANG, Yi-Chin: Optical design of adaptive automotive headlight system with digital micro-mirror device. In: KIDGER, Tina E. (Hrsg.); DAVID, Stuart (Hrsg.): *Illumination Optics II*, SPIE, 2011 (SPIE Proceedings), S. 81700A.
- [UHLE19] UHLENBERG, Gerald; WANG, Alex; CHIU, Huang-Ping; KAO, Murphy: Next-generation DMD-Headlight Module of Maximized Optical Efficiency and Ultra-compact System Packaging. In: *Proceedings of the 7th International Forum on Automotive Lighting (IFAL 2019)*. 2019, S. 63–66.

- [VAND06] VANDORPE, Krist; COULIER, Nico; GERETS, Peter; LESSCHAEVE, Stefan: *Prism assembly*, EP1632804A1, 2006.
- [VELZ14] VELZEL, Chris: *Springer series in optical sciences*. Bd. 183: *A course in lens design*. Dordrecht and Heidelberg and New York and London: Springer, 2014. – ISBN 978–94–017–8684–3.
- [VOGE02] VOGES, Edgar (Hrsg.); PETERMANN, Klaus (Hrsg.): *Optische Kommunikationstechnik: Handbuch für Wissenschaft und Industrie*. Berlin: Springer Berlin, 2002. – ISBN 978–3–642–63134–4.
- [WILL17] WILLIAMS, Thomas: *The Optical Transfer Function of Imaging Systems*. London: Routledge, 2017 (Series in Optics and Optoelectronics). – ISBN 0750305991.
- [WINN12] WINNER, Hermann (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen*. 2., korrigierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012 (Kraftfahrzeugtechnik). – ISBN 978–3–8348–1457–9.
- [WOLF16] WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf; DANOV, Roman; LACHMAYER, Roland: DMD Based Automotive Lighting Unit. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-Proceedings 117. Jahrestagung*, 2016. – ISSN 1614–8436.
- [WOLF17a] WOLF, Alexander: *Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge*, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2017.
- [WOLF17b] WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: *Lighting Device, Lighting Method and Computer Program*, WO2017148764A1, 2017.
- [WOSN12] WOSNITZA, Franz; HILGERS, Hans G.: *Energieeffizienz und Energiemanagement: Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (Praxis). – ISBN 978–3–8348–1941–3.
- [YOLE18] YOLE DÉVELOPPEMENT: *Automotive lighting: new SSL technologies integration is transforming the industry: Extracted from: Automotive Lighting: Technology, Industry and Market Trends report*. Online erhältlich unter: http://www.yole.fr/iso_upload/News/2018/PR_AUTOMOTIVE_LIGHTING_MarketUpdate_YOLE_Nov2018.pdf, abgerufen am 03.10.2020. 2018.

-
- [ZHAO07] ZHAO, Xing; FANG, Zhi-liang; CUI, Ji-cheng; ZHANG, Xin; MU, Guo-guang: Illumination system using LED sources for pocket-size projectors. In: *Applied optics* 46 (2007), Nr. 4, S. 522–526.

Eigene Veröffentlichungen

- [HELD18a] HELD, Marcel P.; LEY, Peer-Phillip; LACHMAYER, Roland: Calculation comparison of an additive and subtractive light modulator for high-resolution pixel-light headlamps. In: TU, Li-Wei (Hrsg.); STRASSBURG, Martin (Hrsg.); KIM, Jong K. (Hrsg.); KRAMES, Michael R. (Hrsg.): *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XXII*, SPIE, 2018. – ISBN 9781510615939.
- [HELD18b] HELD, Marcel P.; LEY, Peer-Phillip; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Anforderungen an die Ausleuchtung von Lichtmodulatoren. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-Proceedings 119. Jahrestagung*, 2018. – ISSN 1614–8436.
- [KNÖC19] KNÖCHELMANN, Marvin; LEY, Peer-Phillip; KLOPPENBURG, Gerolf; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: Methodische Entwicklung eines optomechatronischen Systems am Beispiel eines hochadaptiven Fahrzeugscheinwerfers. In: *Tagungsband der VDI Fachtagung Mechatronik 2019*, Düsseldorf : VDI-Verlag, 2019, S. 7–12.
- [LACH17] LACHMAYER, Roland; KNÖCHELMANN, Marvin; LEY, Peer-Phillip; KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander: Autonomes Fahren und Beleuchtung: Sind heutige Scheinwerfer gut genug für selbstfahrende Autos? In: *Unimagazin* (2017), Nr. 3, S. 54–57.
- [LEY17] LEY, Peer-Phillip; HELD, Marcel P.; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Konzepte für hochauflösende Fahrzeugscheinwerfer unter Berücksichtigung der Étendue. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-Proceedings 118. Jahrestagung*, 2017. – ISSN 1614–8436.
- [LEY18a] LEY, Peer-Phillip; HELD, Marcel P.; LACHMAYER, Roland: Analysis of LED arrangement in an array with respect to lens geometry. In: TU, Li-Wei (Hrsg.); STRASSBURG, Martin (Hrsg.); KIM, Jong K. (Hrsg.); KRAMES, Michael R.

- (Hrsg.): *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XXII*, SPIE, 2018. – ISBN 9781510615939, S. 4.
- [LEY18b] LEY, Peer-Phillip; HELD, Marcel P.; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Konzepte zur Beleuchtung von Lichtmodulatoren. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-Proceedings 119. Jahrestagung*, 2018. – ISSN 1614–8436.
- [LEY19a] LEY, Peer-Phillip; AUGUST, Jannes: *Opt² Hybrid Raytracing Version 1.0.0 [Software]*. Zenodo. 2019.
- [LEY19b] LEY, Peer-Phillip; KNÖCHELMANN, Marvin; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland: Development Methodology for Optomechatronic Systems Using the Example of a High-Resolution Projection Module. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (2019), Nr. 1, S. 2547–2556.
- [LEY19c] LEY, Peer-Phillip; LACHMAYER, Roland: Imaging and non-imaging illumination of DLP for high resolution headlamps. In: DOUGLASS, Michael R. (Hrsg.); LEE, Benjamin L. (Hrsg.); EHMKE, John (Hrsg.): *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XI*, SPIE, 2019. – ISBN 9781510625068.
- [LEY20a] LEY, Peer-Phillip; AUGUST, Jannes; LACHMAYER, Roland: Design tool to develop highly efficient optomechatronic systems. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1* (2020), S. 305–314.
- [LEY20b] LEY, Peer-Phillip; LACHMAYER, Roland: Hybrid Ray Tracing. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-Proceedings 121. Jahrestagung*, 2020. – ISSN 1614–8436.
- [RIZV17] RIZVI, Knöchelmann Marvin Ley Peer-Phillip; LACHMAYER, Roland: Survey of on-road image projection with pixel light systems. In: PÁTA, Petr (Hrsg.); FLIEGEL, Karel (Hrsg.): *Photonics, Devices, and Systems VII*, SPIE, 28.08.2017 - 30.08.2017. – ISBN 9781510617025, S. 33.
- [RIZV18] RIZVI, Sadiq; LACHMAYER, Roland; KNÖCHELMANN, Marvin; LEY, Peer-Phillip: Road safety enhancement: an investigation on the visibility of on-road image projections using DMD-based pixel light systems. In: TU, Li-Wei (Hrsg.); STRASSBURG, Martin (Hrsg.); KIM, Jong K. (Hrsg.); KRAMES, Michael R. (Hrsg.): *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XXII*, SPIE, 2018. – ISBN 9781510615939, S. 60.

Nicht zitierte Veröffentlichungen

LEY, Peer-Phillip; WIRTHS, Laura; OLEFF, Christian; JUNGREITMAYR, Franz; VAJNA, Sandor; PAETZOLD, Kristin; BORG, Jonathan: A methodical approach to integrated product development in total hip arthroplasty. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1* (2020), S. 2009-2018.

BIERMANN, Tobias; GRABE, Tobias; LEY, Peer-Phillip; LACHMAYER, Roland: Potentials and challenges of additive manufacturing using highly transparent silicone materials. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): DGaO-Proceedings 121. Jahrestagung, 2020. – ISSN 1614-8436

BIERMANN, Tobias; ZIEBEHL, Arved; GRABE, Tobias; RÖTTGER, Julian; LEY, Peer-Phillip; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Magnetically actuated solid body PDMS lens. In: DIGONNET, Jiang (Hrsg.); JIANG, Shibin (Hrsg.): *Optical Components and Materials XVIII*, SPIE, 2021. – ISBN 9781510641990

GRABE, Tobias; LAMMERS, Marius; WANG, Song; WANG, Xuejian; RETTSCHLAG, Katharina; SLEIMAN, Khodor; BARROI, Alexander; BIERMANN, Tobias; ZIEBEHL, Arved; RÖTTGER, Julian; LEY, Peer-Phillip; WOLF, Alexander; JAESCHKE, Peter; HERMSDORF, Jörg; KAIERLE, Stefan; AHLERS, Henning; LACHMAYER, Roland: Additive Manufacturing of fused silica using coaxial laser glass deposition: experiment, simulation and discussion. In: HELVAJIAN, Henry (Hrsg.); GU, Bo (Hrsg.); CHEN, Hongqiang (Hrsg.): *Laser 3D Manufacturing VIII*, SPIE, 2021. – ISBN 9781510641891

RETTSCHLAG, Katharina; LEY, Peer-Phillip; KRANERT, Fabian; HINKELMANN, Moritz; KAIERLE, Stefan; LACHMAYER, Roland (2021) Additiv gefertigte Glaskugellinsen für die Anwendung. In: LACHMAYER, Roland; RETTSCHLAG, Katharina; KAIERLE, Stefan (Hrsg.): *Konstruktion für die Additive Fertigung 2020*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. – ISBN 978-3-662-63029-7

BIERMANN, Tobias; LEY, Peer-Phillip; ZIEBEHL, Arved; FELDMANN, Jan; LACHMAYER, Roland (2021) Konzepte für die Additive Fertigung optischer Elemente mit hochtransparenten Silikonwerkstoffen. In: LACHMAYER, Roland; RETTSCHLAG, Katharina; KAIERLE, Stefan (Hrsg.): *Konstruktion für die Additive Fertigung 2020*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. – ISBN 978-3-662-63029-7

Verwendete Normen und Richtlinien

- [CIE1931] DIN EN ISO/CIE 11664-1:2020-03: *Farbmetrik - Teil 1: CIE farbmetrische Normalbeobachter (ISO/CIE 11664-1:2019)*; Deutsche Fassung EN ISO/CIE 11664-1:2019. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN10110-11] DIN ISO 10110-11:2016: *Optik und Photonik – Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme – Teil 11: Allgemeintoleranzen für Werte ohne Toleranzangaben*. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN18040-3] DIN 18040-3:2014-12: *Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum*. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN32975] DIN 32975:2009-12: *Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung*. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN5031-1] DIN 5031-1:1982-03: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik*. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN5031-3] DIN 5031-3:1982-03: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*. Beuth Verlag, Berlin
- [ECE8] ECE-Regelung 8: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Halogenleuchtquellen (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 und/oder H11) für asymmetrisches Abblendlicht oder für Fernlicht oder für beides*. Ausgabedatum 10.07.2010
- [ECE48] ECE-Regelung 48: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen*. Ausgabedatum 30.09.2016
- [ECE99] ECE-Regelung 99: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Gasentladungs-Lichtquellen für genehmigte Gasentladungs-Leuchteinheiten von Kraftfahrzeugen*. Ausgabedatum 30.06.2010

- [ECE112] ECE-Regelung 112: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind.* Ausgabedatum 22.08.2014
- [ECE113] ECE-Regelung 113: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für symmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen, Gasentladungs-Lichtquellen oder LED-Modulen ausgerüstet sind.* Ausgabedatum 14.06.2014
- [ECE123] ECE-Regelung 123: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge.* Ausgabedatum 20.02.2019

Anhang

A Simulationsergebnisse

Abblendlichtverteilungen nach Optimierung des Projektionssystems

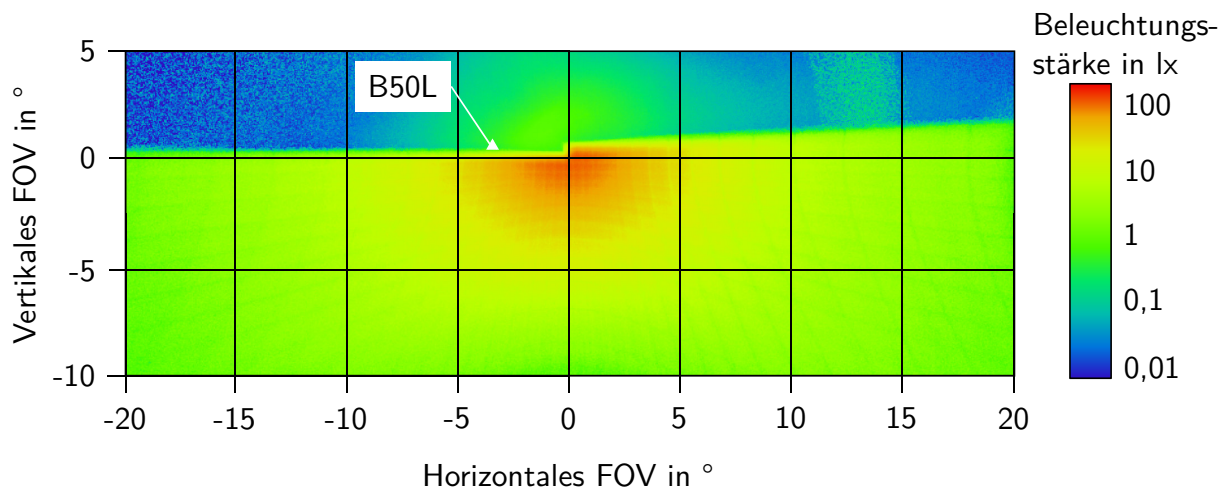


Abbildung 1: Optimierte Abblendlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers

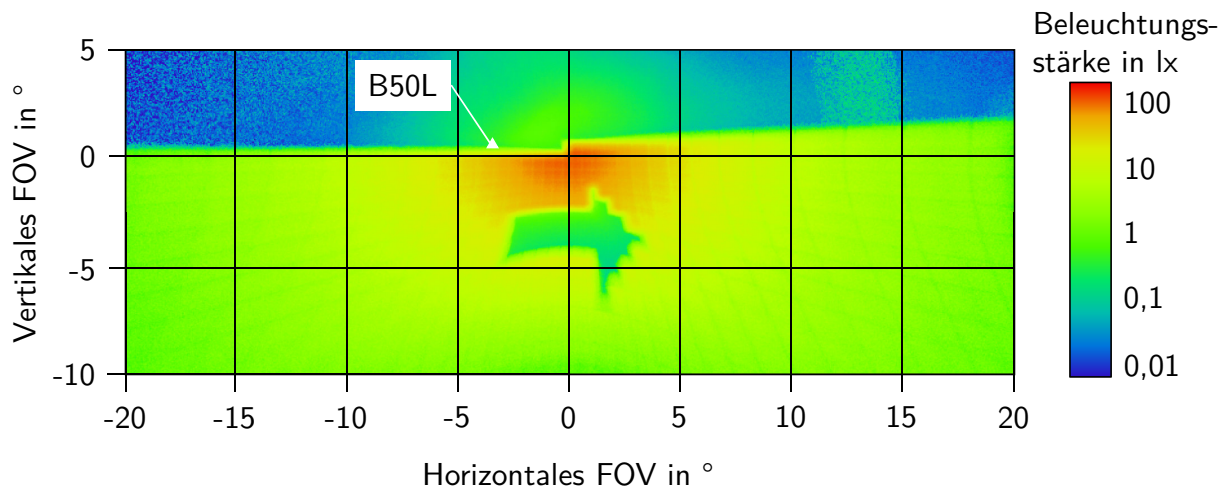


Abbildung 2: Optimierte Abblendlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers mit Pfeilprojektion

Tabelle 3: Photometrische Werte der Abblendverteilungen mit optimiertem Projektionssystem

Abblendlicht	Lichtstrom in lm	E_{Max} in lx	E_{B50L} in lx
ohne Projektion	732	109	0,4
mit Projektion	653	99	0,4

Fernlichtverteilungen nach Optimierung des Projektionssystems

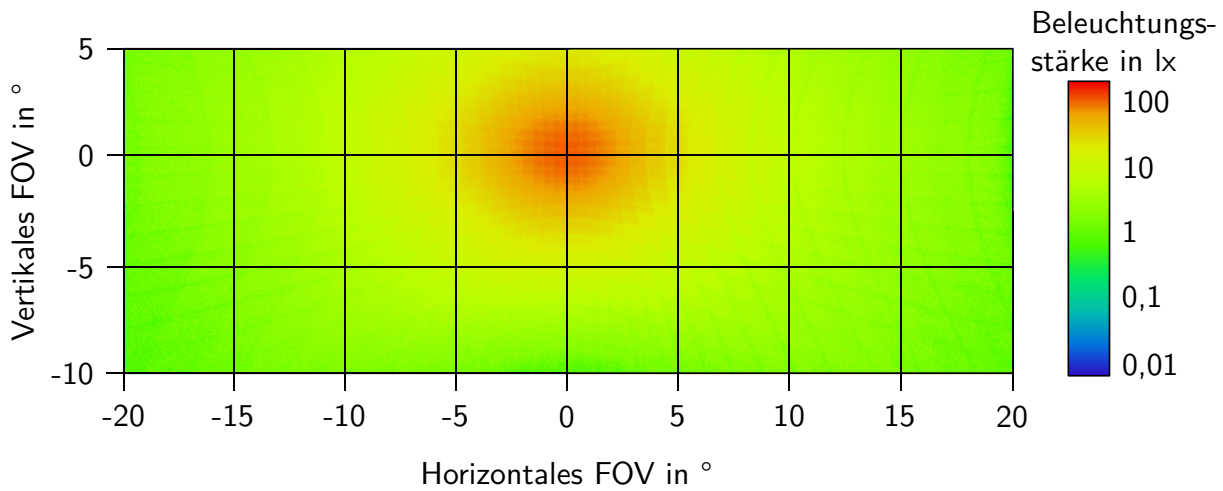


Abbildung 3: Optimierte Fernlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers

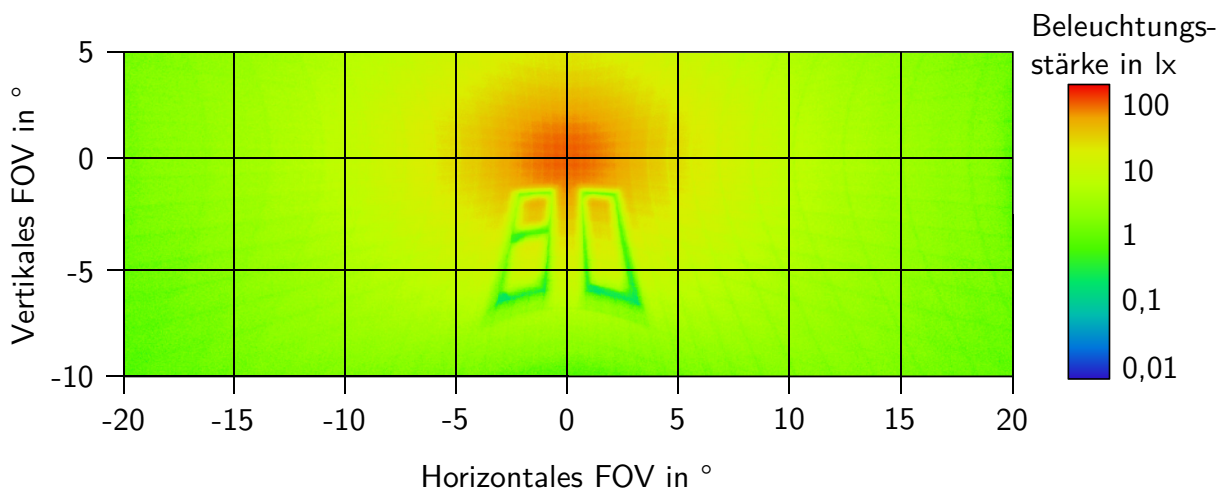


Abbildung 4: Optimierte Fernlichtverteilung des DMD-Scheinwerfers mit 80-Projektion

Tabelle 4: Photometrische Werte der Fernlichtverteilungen mit optimiertem Projektionssystem

Fernlicht	Lichtstrom in lm	E_{Max} in lx
ohne Projektion	1.266	115
mit Projektion	1.187	109

Horizontaler und vertikaler Schnitt durch die Abblend- und Fernlichtverteilung

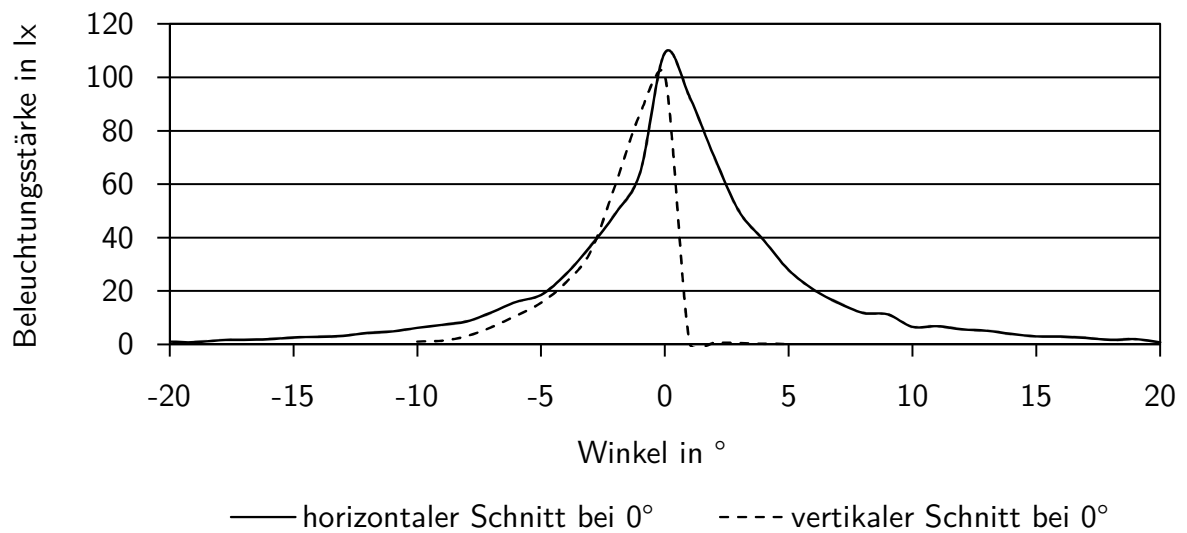


Abbildung 5: Horizontaler und vertikaler Schnitt durch die optimierte Abblendlichtverteilung

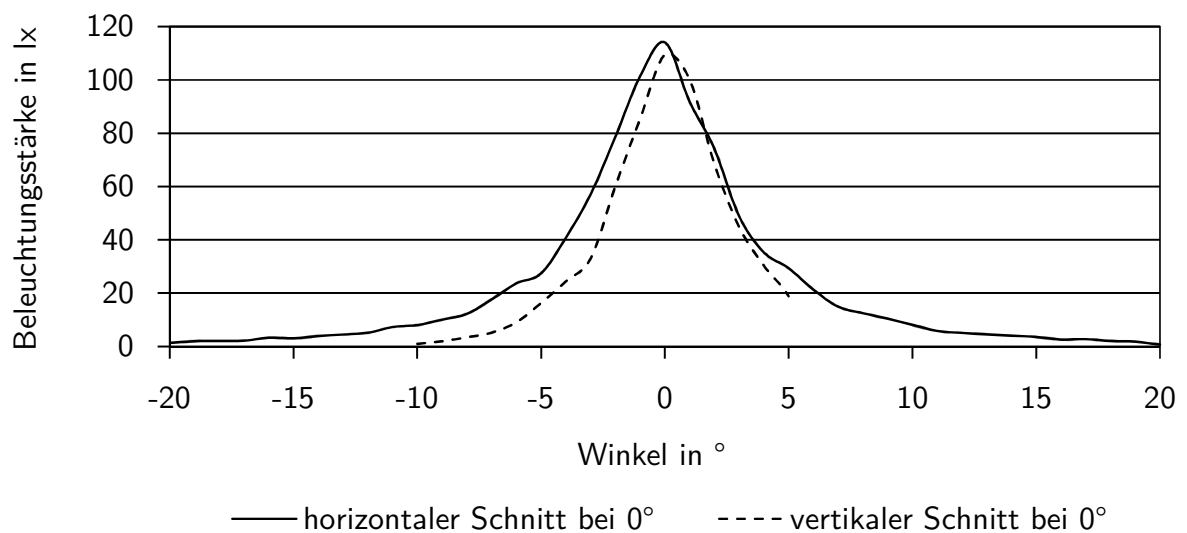


Abbildung 6: Horizontaler und vertikaler Schnitt durch die optimierte Fernlichtverteilung

Optimiertes Projektionssystem

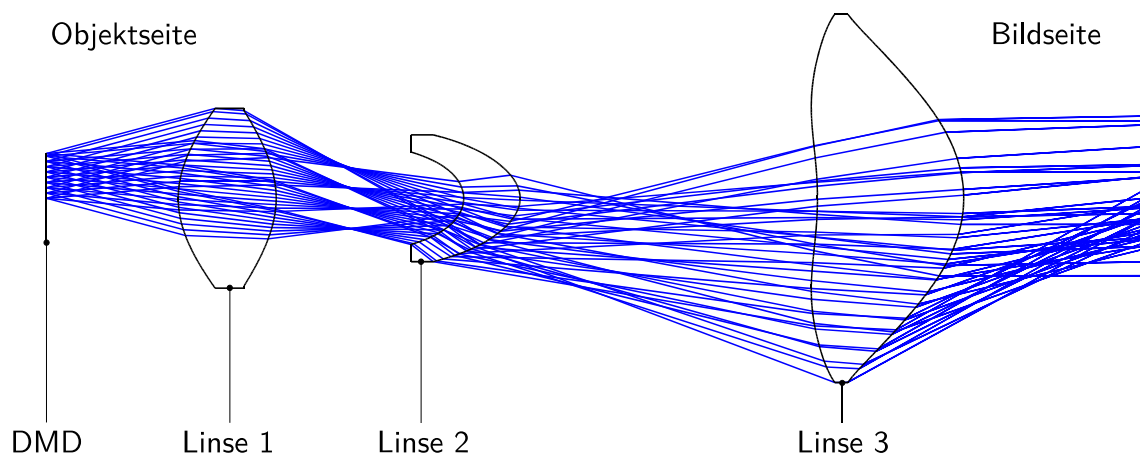


Abbildung 7: Optimierter sequentieller Entwurf des verzeichnenden Projektionssystems

B Betreute studentische Arbeiten

Tabelle 5: Betreute studentische Arbeiten

Name	Art der Arbeit	Titel der Arbeit
Holleman, Maurice	Bachelorarbeit	Konstruktion und Simulation eines Trägersystems zur Aufnahme hochauflösender Fahrzeugscheinwerfer
Busche, Lennart	Bachelorarbeit	Entwicklung eines Bewertungssystems für Fertigungsverfahren optischer Linsen von hochauflösenden Fahrzeugscheinwerfern
Ziebehl, Arved	Bachelorarbeit	Untersuchung fertigungsbedingter Einflüsse auf die Abbildungsqualität hochauflösender Fahrzeugscheinwerfer
Johnson, Jeanne	Masterarbeit	Thermomanagement für LED Arrays in der Fahrzeuglichttechnik
Leyh, Robert	Bachelorarbeit	Parametrische Modellierung von Leuchtstoffen für die hybride Optiks simulation
Möller, Jens	Diplomarbeit	Simulation und Ansteuerung einer HLD Lichtquelle zur Überlagerung verschiedener Wellenlängen
Naujoks, Julian	Bachelorarbeit	Konzeptionierung eines ex-vivo Perfusionssystems für Extremitäten
Hartmann, Kristin	Bachelorarbeit	Entwicklung eines Algorithmus zur Überwachung und Steuerung für ein Perfusionssystem

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Peer-Phillip
Geburtsdatum 04. Juni 1987
Geburtsort Hannover

Akademischer Werdegang

seit 2016 Doktorand an der Fakultät für Maschinenbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

2007 - 2015 Diplom-Studium Maschinenbau an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Vertiefungen: Biomedizintechnik und Produktion & Logistik
Abschluss: Diplom Ingenieur Maschinenbau

Schulbildung

1999 - 2006 Freies Gymnasium Hannover
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Beruflicher Werdegang

seit 2020 Leiter der Arbeitsgruppe *Optiksimulation & Technologien* der Abteilung Optomechatronik am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover in der Arbeitsgruppe Optomechatronik

2010 - 2015 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Berufliche Zusatzqualifikation

In 2019 Integrated Product Development International Summer School (ipdISS) 2019, Magdeburg und Malta