

Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge

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

Dissertation

von
Dipl.-Ing.
Alexander Wolf

2017

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
 2. Referent: Prof. Dr. Cornelius Neumann
- Prüfungsvorsitz: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Tag der Promotion: 7. November 2016

Danke, Jesus, für alles

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.

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer für die Möglichkeit, diese äußerst interessante Arbeit an Seinem Institut zu schreiben, für die wissenschaftliche Betreuung, die wertvollen Anregungen und den vertrauensvollen Umgang während meiner Zeit als Doktorand. Vielen Dank an Prof. Dr. Cornelius Neumann für das Koreferat dieser Arbeit und an Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens für das Übernehmen des Prüfungsvorsitzes.

Ein herzliches Dankeschön an meine Kolleginnen und Kollegen am IPEG für die fachlich professionelle und gleichzeitig freundschaftliche Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht dabei an Gerolf Kloppenburg, der teils durch Seine Vorarbeiten, teils durch Seine fachliche Expertise viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Danke für Deine Hilfsbereitschaft und Unterstützung. Derselbe besondere Dank geht an Gorden Reh und Joachim Klatt aus der Werkstatt des Instituts, ohne deren außergewöhnlichen Einsatz die in dieser Arbeit präsentierten Muster-scheinwerfer undenkbar wären.

Vielen Dank an alle Studentinnen und Studenten, die ich im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut betreuen konnte und deren Ergebnisse teilweise in diese Arbeit eingeflossen sind. Danke an alle Forschungs- und Industriepartner, die dieses Projekt teilweise mit Hardware, teilweise im Rahmen sehr guter fachlicher Gespräche unterstützt haben. Hier möchte ich mich ganz besonders bei Dr.-Ing. Stefan Brückner und Claudia Süssmilch für den so wertvollen Austausch bedanken.

Ganz besonders Danke an alle meine Freunde und meine Familie für all die Freundschaft, Ermutigung und Unterstützung.

Alexander Wolf

Hannover, im Oktober 2016

Kurzfassung

Die Entwicklung von Fahrzeugscheinwerfern wird neben ökonomischen Aspekten maßgeblich von den Faktoren Funktionalität, Zulassungskonformität und Ästhetik geprägt. Dabei steht der Wunsch nach kompakten optischen Systemen im Widerspruch zur Erzeugung einer guten Lichtverteilung mit hohen Lichtstärken und ausgeprägten Gradienten. Der Einsatz von Laserdioden eröffnet neue Lösungsmöglichkeiten, da sie durch die kleine Lichtaustrittsfläche, den begrenzten Abstrahlwinkel und die hohe Emissionsleuchtdichte die Entwicklung besonders kompakter Scheinwerfer ermöglichen, ohne dabei Einbußen in der erzeugten Lichtverteilung in Kauf nehmen zu müssen.

In dieser Arbeit werden verschiedene Konzepte für laserbasierte Fahrzeugscheinwerfer am Beispiel eines Zusatzfernlichts beleuchtet. Als Lichtquelle wird ein sogenanntes *Remote Phosphor* System, die Kombination aus - in diesem Fall blauen - Laserdioden mit einem in einiger Entfernung positionierten frequenzkonvertierenden Leuchtstoff genutzt. Verschiedene Einsatzarten des Konvertermaterials und Strategien zur Lichtlenkung auf den Leuchtstoff werden mit Linsen- und Reflektorsystemen zu Scheinwerfermodulen kombiniert. Da Klasse-4-Laser verwendet werden, müssen außerdem geeignete aktive und passive Sicherheitskonzepte diskutiert werden. Anschließend werden anhand von Paraboloidreflektoren der Umlenkwirkungsgrad und die maximal mögliche Schärfe einer zu erzeugenden Lichtverteilung hergeleitet.

Drei unterschiedliche Musterscheinwerfer werden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut, wobei ein Fokus auf der Ermittlung einer guten Lichtverteilung für Zusatzfernlichter liegt. Gleichzeitig werden verschiedene Möglichkeiten zur Justage der Laserdioden betrachtet. Sie dient dazu, die auf dem Leuchtstoff zur Emission angeregte Fläche mit dem Brennpunkt des optischen Systems zu überlagern. Abschließend werden die erzielten Erkenntnisse zum Einsatz von Laserlichtquellen auf weitere Anwendungsgebiete der Fahrzeuglichttechnik übertragen.

Schlagwörter: Fahrzeugscheinwerfer, Laserdiode, Beleuchtungstechnik

Abstract

Title: Laser based vehicle headlamps. Fundamentals and elaboration using an additional high beam module as example.

The development of vehicle headlamps is mainly influenced by economic aspects, functionalities, the fulfilment of legal regulations as well as design aspects. The desire for compact optical systems is in contradiction to the generation of an advanced light distribution with strong gradients and high luminous intensities. The use of laser diodes opens up new solutions due to their small light emitting surface, defined beamwidth and high emission luminance. This allows the realisation of compact headlamps without having to reduce the quality of the light distribution.

Different concepts for laser-based vehicle headlamps are presented in this thesis, using an additional highbeam module as example. The light source, a so-called *remote phosphor* system, is based upon the combination of blue laser diodes with a phosphor converter in remote position. Possible reflector- and lens-based headlamp systems are developed by analysing different ways to use the converter material and strategies in order to illuminate it. Due to the fact that class-4-lasers are used appropriate active and passive safety concepts are considered. Based on parabolic reflectors the efficiency of the optical system and the possibility to generate sharp light distributions are derived.

In this thesis three different headlamp prototypes are developed and set up. One focus is the determination of a good light distribution for the additional highbeam module. At the same time different strategies to adjust the diodes are investigated. This adjustment is necessary in order to align the excited area of the phosphor material with the focus point of the optical system. Finally, the gained knowledge about laser-based systems is transferred to further vehicle lighting applications.

Key words: Vehicle headlamp, Laser diode, Lighting technology

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VI
Abstract	VII
Abkürzungen und Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
2 Lichttechnische Grundlagen	4
2.1 Physiologie des menschlichen Auges	4
2.1.1 Farbwahrnehmung	5
2.1.2 Helligkeitsempfinden	7
2.2 Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik	8
2.2.1 Abstrahlcharakteristik	8
2.2.2 Abbildungsmaßstab	10
2.2.3 Étendue	11
3 Grundlagen der Fahrzeugscheinwerfer	14
3.1 Scheinwerferfunktionen	14
3.2 Lichtquellen für Fahrzeugscheinwerfer	18
3.3 Reflektoren und optische Systeme für Fahrzeugscheinwerfer	21
3.3.1 Geometrische Grundkörper für Reflektoren	21
3.3.2 Optische Konzepte für Fahrzeugscheinwerfer	23
4 Einsatz von Laserdioden in der Beleuchtungstechnik	27
4.1 Laserdioden	27
4.2 Weißlichterzeugung mit Laserdioden	28
4.3 Leuchtstoffe	31
4.3.1 Der Leuchtstoff YAG:Ce	36
4.3.2 Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrads	39
4.3.3 Einfluss der Bestrahlungsstärke	41
4.4 Lichtquellen auf Basis von Laserdioden und Leuchtstoffen	41
4.4.1 Étendue eines angeregten Leuchtstoffs	42
4.4.2 Wirkungsgrad des Systems	43

5	Optische Konzepte für Laserscheinwerfermodule	48
5.1	Anforderungen	48
5.2	Konzepte für Laserscheinwerfer	52
5.2.1	Anregung des Leuchtstoffs	52
5.2.2	Optisches System	53
5.2.3	Lichtlenkung auf den Leuchtstoff	56
5.2.4	Lasersicherheit	57
5.2.5	Gesamtsystem	61
5.3	Wirkungsgrad von Paraboloidreflektoren für Lambertstrahler	64
5.3.1	Emissionscharakteristik eines Lambertstrahlers	65
5.3.2	Geometrische und lichttechnische Größen an Paraboloidreflektoren	66
5.3.3	Paraboloidreflektoren für Rückprojektion (Konzept A)	68
5.3.4	Paraboloidreflektor für Frontprojektion (Konzept B)	71
5.3.5	Verbesserung des Wirkungsgrads von Frontprojektionssystemen	73
5.3.6	Wendebilder an Paraboloidreflektoren	75
5.3.7	Erzeugung von scharfen Hell-Dunkel-Grenzen	80
5.3.8	Nicht-rotationssymmetrische Paraboloidreflektoren (Konzept C)	82
6	Versuche und Versuchsauswertungen	85
6.1	Laserdioden	85
6.1.1	Wirkungsgrad	85
6.1.2	Spektrum und Kohärenz	88
6.2	Leuchtstoffe	91
6.2.1	Farbort und Spektrum reflektiv eingesetzter Leuchtstoffe	92
6.2.2	Einfluss von Schichtstärke und Dotierung	96
6.2.3	Lokale Emission	102
6.2.4	Abstrahlcharakteristik im Fernfeld	104
6.2.5	Anforderungen an Leuchtstoffe für Fahrzeugscheinwerfer	106
6.3	Muster I	107
6.3.1	Materialien und Fertigungsverfahren	108
6.3.2	Ausarbeitung des Moduls	109
6.3.3	Simulation	112
6.3.4	Messergebnisse	114
6.3.5	Optimierungspotential	116
6.4	Muster II	116
6.4.1	Ausarbeitung des Moduls	117
6.4.2	Simulation	120
6.4.3	Messergebnisse Lichtverteilung	121
6.4.4	Messergebnisse Lichtausbeute und Wirkungsgrad	123
6.4.5	Optimierungspotential	128
6.5	Muster III	129
6.5.1	Ausarbeitung des Moduls	130
6.5.2	Ergebnisse	132

7 Zusammenfassung und Ausblick	134
7.1 Zusammenfassung	134
7.2 Ausblick: Weitere Anwendungsgebiete von Laserlichtquellen im Fahrzeug . . .	137
Literaturverzeichnis	140
Anhang	151
A Tabellen	151
B Betreute studentische Arbeiten	154

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AFS	Adaptive Frontlighting System
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CIE	Commission internationale de l'éclairage, Internationale Beleuchtungskommission
cw	continuous wave, Dauerbetrieb eines Lasers
DMD	Digital Mirror Device, Mikrospiegelarray
DOE	Diffraktives optisches Element
ECE	Economic Commission for Europe, Wirtschaftskommission für Europa bei den Vereinten Nationen
ESA	Excited-state absorption
FWHM	Full width at half maximum, Kenngröße für die Breite eines Spektrums
HDG	Hell-Dunkel-Grenze einer Lichtverteilung
HID	High-intensity discharge, Hochdruck-Gasentladungslampe
HSC	High Speed Cutting, Hochgeschwindigkeitszerspanung
HV	Zentraler Punkt einer Scheinwerfer-Lichtverteilung
LCD	Liquid Crystal Display, Flüssigkristalldisplay
LD	Laserdiode
LED	Lichtemittierende Diode
LER	Luminous efficacy of radiation, Lichtausbeute
LER _{max}	Theoretisch maximale Lichtausbeute in Abhängigkeit von Farbwiedergabeindex und Farbtemperatur
LWL	Lichtwellenleiter
NIR	Nah-Infrarot-Strahlung, 780 nm ... 3000 nm
PES	Poly-Ellipsoid-Surfaces, ein aus Ellipsoidsegmenten zusammengesetzter Reflektor
PMMA	Polymethylmethacrylat
PWM	Pulsweitenmodulation
RGB	Additive Farbmischung aus rot, grün und blau
SAE	SAE International, ehemals: Society of Automotive Engineers, Verband der Automobilingenieure
SKT	Skalenteile
SUV	Sport Utility Vehicle
SW	Scheinwerfer
TIR	Total internal reflection, Totalreflexion

UV	Ultraviolette Strahlung
UV-A	Langwellige Ultraviolettstrahlung, 315 nm ... 380 nm
WPE	Wall-plug efficiency, Verhältnis aus abgegebener optischer und aufgenommener elektrischer Leistung
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat $Y_3Al_5O_{12}$, ein Leuchtstoff

Lateinische Notation

a	Beschleunigung
A	Fläche
c	Lichtgeschwindigkeit
c	Konzentration
d	Durchmesser von Reflektor oder Lichtquelle
d^*	Normierter Durchmesser
E	Beleuchtungsstärke
E	Energie
\mathcal{E}	Étendue
f	Brennweite
h	Höhe
h	Planck'sches Wirkungsquantum
I	Lichtstärke
I	Stromstärke
I_{th}	Stromstärke der Laserschwelle einer Laserdiode
k	Kegelschnittkonstante
K_m	Photometrisches Strahlungsäquivalent, $K_m = 683 \text{ lm/W}$
l	Länge
l^*	Normierte Länge
l_c	Kohärenzlänge
L	Leuchtdichte
L_U	Umgebungsleuchtdichte
n	Brechzahl
px	Pixel
P_V	Verlustleistung
r	Abstand zwischen Lichtquelle und optischem Element
R	Krümmungsradius
R_a	Farbwiedergabeindex
R_{th}	Thermischer Widerstand
s	Strecke
t	Zeit
t_R	Reaktionszeit
T	Temperatur

$T_{0,5}, T_{0,8}$	Temperatur, bei der die Emission des Leuchtstoffs halb bzw. 0,8-mal so groß ist wie bei Bezugstemperatur
T_C	Gehäusetemperatur (Casetemperatur) einer Laserdiode oder LED
T_J	Sperrschichttemperatur (Junctiontemperatur) einer Laserdiode oder LED
v	Geschwindigkeit
V	Photopische Empfindlichkeit des menschlichen Auges nach CIE 1931
x, y, z	Achsen des kartesischen Koordinatensystems
x, y, z	Farbortskordinaten nach CIE 1931
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Tristimuluskurven nach CIE 1931
X, Y, Z	Intensitätseindrücke der drei Zapfentypen nach CIE 1931

Griechische Notation

α	Öffnungswinkel eines Strahlenbündels
α^*	Normierter Öffnungswinkel
β	Neigungswinkel der Emissionsfläche
δ	Akzeptanzwinkel eines optischen Systems
ε	Ein- bzw. Ausfallswinkel des Lichts
η	Wirkungsgrad
λ	Wellenlänge
λ_h	Halbwertsbreite FWHM eines Spektrums
Ω	Raumwinkel
φ	Umfangswinkel
Φ	Lichtstrom
Φ_e	Optischer Strahlungsfluss
ϱ	Reflexionsgrad

1 Einleitung

Die Entwicklung von Kraftfahrzeugen wird maßgeblich von den Faktoren Funktion und Design beeinflusst. Gleiches gilt für deren Scheinwerfer. Dienten erste Fahrzeugscheinwerfer mehr dem Gesehen werden als dem Sehen, so sind beide Forderungen längst untrennbar miteinander verknüpft. Auf der Gestaltungsseite ist seit einigen Jahrzehnten ein Trend zu immer flacheren Scheinwerfern zu beobachten. Je kleiner ein Scheinwerfer wird, desto schwieriger ist die Erzeugung einer zulassungskonformen Lichtverteilung. Durch eine toleranzarme Fertigung und Montage kann dieser Forderung in gewissem Rahmen begegnet werden. Signifikante Verringerungen der Scheinwerferbauhöhe lassen sich jedoch nur durch den Einsatz eines besser geeigneten optischen Konzepts erzielen. Lange Zeit waren Projektionsmodule mit Halogen- oder Xenonlichtquellen die kompaktesten Fahrzeugscheinwerfer. Seit Anfang dieses Jahrtausends sind LED-Systeme erhältlich, mit denen die erforderliche Bauhöhe noch einmal deutlich reduziert werden konnte (vergleiche Tabelle 1.1).

Parallel zu dem vermehrten Einsatz des Fahrzeugscheinwerfers als gestalterisches Element wird ihre Funktionalität stetig erhöht. Vor allem die Einführung der AFS-Scheinwerfer im Jahre 2006 sowie der LED-basierten Matrixscheinwerfer im Jahre 2013 ist hervorzuheben [LACH16]. Ziel dieser Systeme ist es, den Verkehrsraum optimal auszuleuchten und nur dort, wo sich beispielsweise Gegenverkehr befindet, die Lichtstärke zu reduzieren, um Blendung zu vermeiden. Aus gestalterischer Sicht bieten LED-Scheinwerfer deutlich mehr Möglichkeiten die Fahrzeugfront charakteristisch zu prägen als klassische Halogen- oder Xenonsysteme. Außerdem sind mit LED-Systemen höhere Wirkungsgrade erreichbar.

Tabelle 1.1: Bauhöhe von Abblendlichtscheinwerfern nach [ALBO13]

Jahr	Fahrzeug	Bauhöhe (ca.) in <i>mm</i>	Technologie
1972	Ford Gran Torino	100	Konventioneller Reflektor, Halogenlichtquelle
1989	Citroen XM	70	Freiformreflektor, Halogenlichtquelle
1996	Renault Safrane	60	Projektionsmodul
2007	Audi R8	45	LED Modul
2012	Seat Leon	40	LED Modul

Einen nächsten Schritt in dieser Entwicklung stellen Scheinwerfer auf Basis von Laserdioden und Leuchtstoffen dar. Ähnlich dem Funktionsprinzip der meisten weißen LEDs werden hier blaue Laserdioden in Kombination mit einem Leuchtstoff eingesetzt, der einen Teil des blauen Laserlichts in gelbes Licht konvertiert [SCHU06]. Zusammen mit dem restlichen blauen Licht entsteht weißes Licht. Durch die sehr kleine Lichtemissionsfläche der Laserdioden lassen sich auf dem Leuchtstoff hohe Energie- und Leuchtdichten erzeugen. Dadurch können kleinere optische Systeme genutzt werden, als es mit LEDs oder klassischen Leuchtmitteln möglich ist. Eine exakte Fertigung vorausgesetzt können Linsen und Reflektoren deutlich kleiner gestaltet werden, ohne Einbußen in der Qualität der erzeugten Lichtverteilung in Kauf nehmen zu müssen. Laserbasierte Beleuchtungssysteme können somit eine ideale Lösung darstellen, wenn es um die Realisierung kompakter Beleuchtungseinrichtungen geht [LACH14b], [LACH14c].

Zur Erhöhung der Sichtweite wird das klassische Fernlicht in vielen Scheinwerfersystemen mit einem weiteren Lichtmodul ergänzt. Dieses Zusatzfernlicht stellt ein ideales Beispiel für laserbasiertes Fahrzeuglicht dar, welches mit dem Ansatz des *Remote Phosphors* platzsparend umgesetzt wird. Während diese Arbeit entstanden ist sind seit 2014 drei Fahrzeugmodelle in den Markt gekommen, welche auf Laserdioden basierende Lichtsysteme nutzen (*BMW i8*, *Audi R8 LMX* und *Audi R18 e-tron quattro*) [WERK14], [WEBE14a], [WEBE14b], [LEHN14], [FRIE14]. Die Stückzahlen dieser mit Laserscheinwerfern ausgerüsteten Fahrzeuge sind gering, so dass die stark technologiegetriebene Entwicklung dieser Systeme noch keinen Durchbruch von Laserscheinwerfern im Fahrzeugumfeld darstellt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen für laserbasierte Lichtsysteme im Fahrzeugkontext herausgearbeitet und exemplarisch erprobt. Als Beispiel wird ein Zusatzfernlicht-Modul gewählt, da diese Lichtfunktion nur mit dem Einsatz einer Lichtquelle mit hoher Leuchtdichte platzsparend umgesetzt werden kann. Zudem ist die Systemkomplexität dieses statischen Moduls gut beherrschbar. Die am Beispiel erarbeiteten Zusammenhänge werden im letzten Kapitel dieser Arbeit auf den Einsatz von Laserlichtquellen für weitere Scheinwerferfunktionen wie adaptive Beleuchtungssysteme übertragen.

Eine wichtige Herausforderung ist der Wirkungsgrad des Scheinwerfersystems, der außer von den Umgebungsbedingungen im Kraftfahrzeug maßgeblich von der Gestaltung des optischen Systems abhängt. In dieser Arbeit werden verschiedene Möglichkeiten zur Strahlenkung auf den Leuchtstoff betrachtet. Zur Realisierung eines kompakten optischen Systems muss eine hohe Leuchtdichte auf dem Leuchtstoff erzeugt werden, so dass dieses Bauteil an der Grenze seiner thermischen Belastbarkeit betrieben wird. Da die erzeugte Strahlung möglichst verlustfrei zum Formen der Ziellichtverteilung umgelenkt werden soll, werden unterschiedliche optische Konzepte erarbeitet und verglichen. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass nicht jeder Bereich eines optischen Systems wie einer Linse oder eines Reflektors gleich gut zum Erzeugen hoher Lichtstärken oder scharfer Hell-Dunkel-Grenzen geeignet ist.

In Kapitel 2 werden die in dieser Arbeit benötigten lichttechnischen Grundlagen aufbereitet. Beleuchtet werden Aspekte der Helligkeits- und Farbwahrnehmung und der Abstrahlcharakteristik von Lichtquellen. Ferner wird das sogenannte Abbildungsgesetz erläutert und die Größe

der Étendue eingeführt. Mit Hilfe des Abbildungsgesetzes kann die Abbildungsleistung eines optischen Systems anhand der Größe der Lichtquelle und dem Abstand zwischen Lichtquelle und Linse oder Reflektor bestimmt werden. Die Größe der Étendue ermöglicht eine Charakterisierung von Lichtquellen hinsichtlich Abstrahlwinkel und lichtemittierender Fläche. Sie stellt eine Erhaltungsgröße der technischen Optik dar, deren Bedeutung für Scheinwerfer hergeleitet wird.

Der Stand der Technik von Fahrzeugscheinwerfern wird in Kapitel 3 präsentiert. Zudem werden grundlegende Konzepte für optische Reflektoren in diesem Kapitel erläutert sowie ihre Anwendung in Fahrzeugscheinwerfern präsentiert. Diese Grundlagen stellen den Ausgangspunkt des zu entwickelnden Fernlichtmoduls dar.

Verschiedene Möglichkeiten zur Weißlichterzeugung mit Laserdioden werden in Kapitel 4 gegenübergestellt und bewertet. Dabei wird auf die Eigenschaften von Laserdioden und Leuchtstoffen und auf deren thermisches Verhalten eingegangen, welches mit den Umgebungsbedingungen im Fahrzeugscheinwerfer abgeglichen werden muss.

In Kapitel 5 werden Konzepte für die verschiedenen Teilsysteme eines Laserscheinwerfers erarbeitet und zu Lösungsvarianten des Gesamtsystems kombiniert. Hierzu werden zunächst die geometrischen und lichttechnischen Zusammenhänge von Paraboloidreflektoren hergeleitet, welche die Grundlage für eine Vielzahl von Scheinwerfern bilden. Der Wirkungsgrad des Reflektors wird in Kombination mit Laserlichtquellen bewertet, welche als Lambertstrahler Strahlung in einen 2π -Halbraum emittieren. Eine Herleitung der Größe der sogenannten Wendelbilder liefert Aufschlüsse über die Abbildungsschärfe und Lichtstärke, die mit verschiedenen Bereichen eines solchen Reflektors erreicht werden kann. Da Klasse-4-Laserdioden zum Einsatz kommen, werden in diesem Kapitel geeignete passive und aktive Sicherheitskonzepte erläutert.

Nach einer Bewertung der Scheinwerferkonzepte aus Kapitel 5 werden in Kapitel 6 drei auf Paraboloidreflektoren basierende Muster aufgebaut. Die einzelnen Prototypen werden hinsichtlich ihrer lichttechnischen Parameter untersucht und verglichen. Besondere Beachtung kommt den eingesetzten Leuchtstoffen zu, deren Wirkungsgrad stark temperaturabhängig ist. Die drei von den Zusatzfernlichtmodulen erzeugten Lichtverteilungen werden verglichen. Gleichzeitig erfolgt eine Optimierung der Justierbarkeit des Systems. Vor allem die Emission der je nach Aufbau drei oder vier Laserdioden muss auf dem Leuchtstoff im Brennpunkt des optischen Systems exakt überlagert werden. Drei verschiedene Lösungsansätze werden vorgestellt. Hierbei kommt der thermischen Anbindung der Dioden, die im Rahmen der Justage teilweise bewegt werden müssen, eine besondere Bedeutung zu.

In der Zusammenfassung werden die drei Musterscheinwerfer abschließend verglichen. Im Ausblick wird schließlich erörtert, für welche weiteren Lichtfunktionen im Fahrzeugumfeld laserbasierte Lichtquellen sinnvoll eingesetzt werden können.

2 Lichttechnische Grundlagen

Auf den nächsten Seiten werden die lichttechnischen Grundlagen kurz zusammengefasst, auf welche in den folgenden Kapiteln Bezug genommen wird. Der erste Teil befasst sich mit der Wahrnehmung von Licht durch das gesunde menschliche Auge. Hieraus leiten sich die SI-Einheit Candela (cd) sowie die Größen zur Bewertung einer Lichtfarbe ab. Im zweiten Abschnitt wird auf die Parameter Abbildungsmaßstab und Étendue eingegangen, welche die Baugröße eines optischen Systems in Abhängigkeit der Lichtquelle maßgeblich bestimmen.

2.1 Physiologie des menschlichen Auges

Das menschliche Auge ist, vereinfacht betrachtet, empfindlich für elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm [CIE1931]. Als Rezeptoren dienen einerseits die sogenannten Stäbchen, die bereits bei geringer Umgebungshelligkeit arbeiten und das Erkennen von Graustufen ermöglichen, und andererseits die Zapfen, welche ab einer entsprechenden Beleuchtungsstärke dem Farbsehen dienen. Beim Nachtsehen sind nur die Stäbchen aktiv, wohingegen das Tagsehen den Bereich des Farbsehens beschreibt. Dazwischen liegt mit dem Dämmerungssehen ein Übergangsbereich (Tabelle 2.1). Die Empfindlichkeit der drei verschiedenen Zapfentypen ist jeweils von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Ein gesunder Mensch besitzt s-Zapfen, welche auf kurzwelliges Licht reagieren, m-Zapfen, welche den gesamten Bereich von 380 nm bis 780 nm erfassen, grünes Licht jedoch besonders stark wahrnehmen, und l-Zapfen, welche vor allem auf langwelliges Licht reagieren und ein lokales Minimum ihrer Empfindlichkeit bei etwa 505 nm aufweisen [CIE 1931].

Zur Bestimmung von Helligkeit und Farbwahrnehmung wird gemäß der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) ein Sichtfeld von 2° bewertet. Reale Sichtfelder führen zu abweichenden Farb- und Helligkeitseindrücken, da die Stäbchen und einzelnen Zapfentypen ungleich-

Tabelle 2.1: Bereiche für Tag-, Dämmerungs- und Nachtsehen nach [REIF14]

Bezeichnung	Umgebungsleuchtdichte L_U in cd/m^2
Tagsehen / Photopisches Sehen	$10^1 < L_U$
Dämmerungssehen / Mesopisches Sehen	$10^{-3} < L_U < 10^1$
Nachtsehen / Skotopisches Sehen	$L_U < 10^{-3}$

mäßig über die Netzhaut verteilt sind. Somit reagieren die einzelnen Winkelbereiche des Auges unterschiedlich stark auf verschiedene Wellenlängen. Beispielsweise ist die Dichte der blauempfindlichen s-Zapfen im fovealen Bereich, also dem Bereich, mit dem wir Objekte anschauen, wenn wir sie direkt fokussieren, besonders gering [SHAR99].

2.1.1 Farbwahrnehmung

In Abbildung 2.1 ist die Empfindlichkeit der Zapfen dargestellt, wie sie 1931 von der CIE herausgegeben wurde [CIE1931]. Die drei Empfindlichkeitskurven der Zapfentypen werden als Tristimuluskurven bezeichnet. \bar{x} steht für die Empfindlichkeit der l-Zapfen, \bar{y} für die der m-Zapfen und entsprechend \bar{z} für die der s-Zapfen.

Die maximale Empfindlichkeit der m-Zapfen, welche bei $\lambda = 555 \text{ nm}$ auftritt, wird auf den Wert 1,0 normiert. Die Amplitude der beiden anderen Kurven wird so skaliert, dass die Fläche unter allen drei Kurven gleich groß ist.

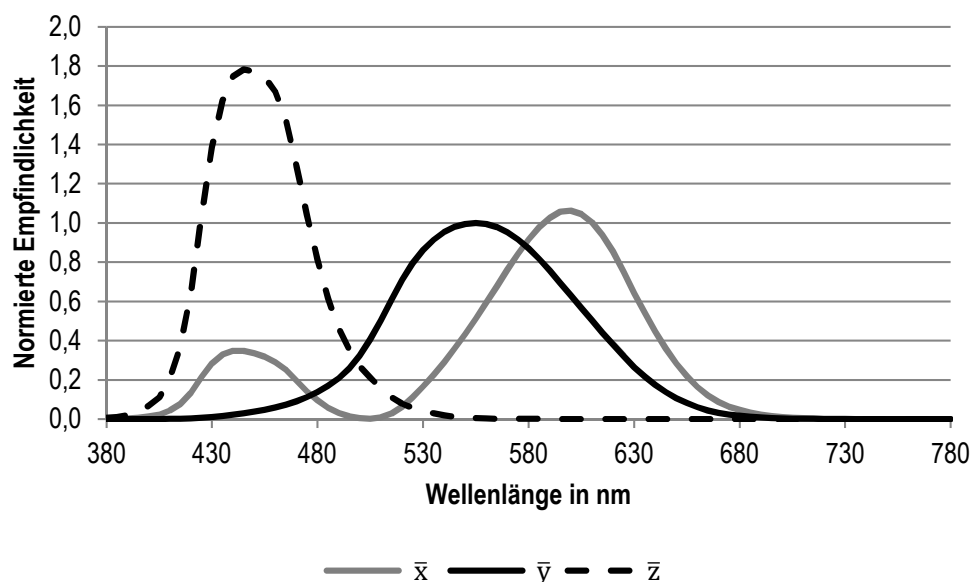


Abbildung 2.1: CIE 1931 Tristimuluskurven nach [CIE1931]

Sichtbares Licht setzt sich im Allgemeinen aus mehreren Wellenlängen zusammen. Der Farbeindruck, welchen ein der Norm entsprechender Beobachter wahrnimmt, ergibt sich aus der wellenlängenabhängigen Emission der betrachteten Lichtquelle $\Phi_{e,\lambda}$ und den integralen Intensitätseindrücken X , Y und Z der drei Zapfentypen, den sie erzeugt:

$$X = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} \bar{x} d\lambda \quad (2.1)$$

$$Y = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} \bar{y} d\lambda \quad (2.2)$$

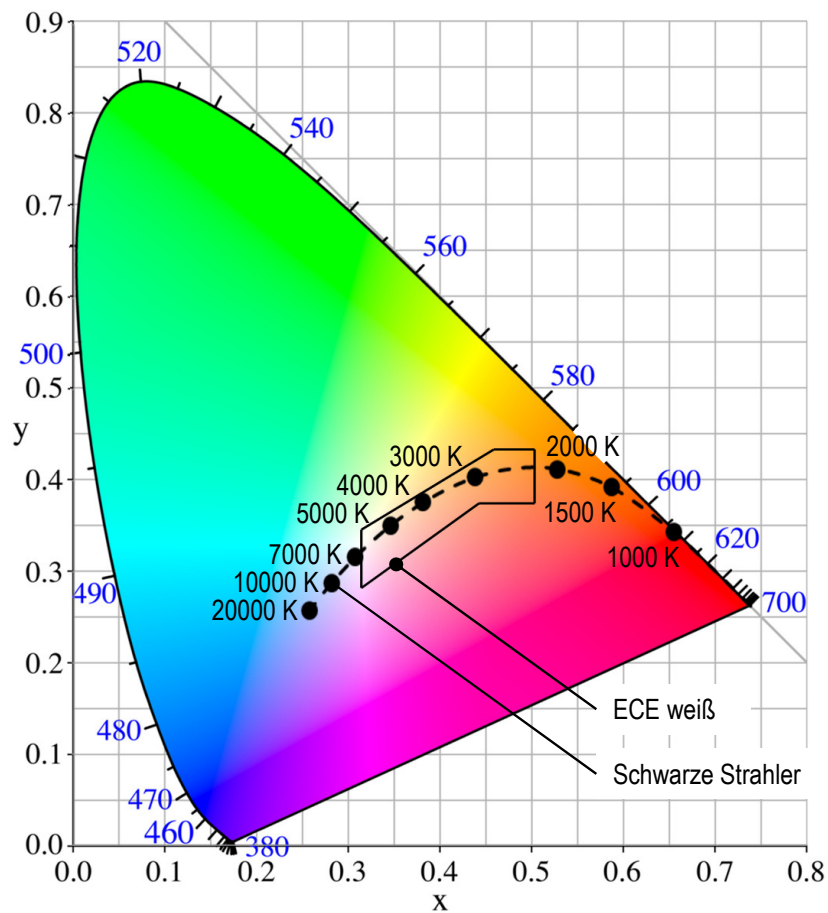


Abbildung 2.2: Normfarbtafel nach [CIE1931] mit Kurve der schwarzen Strahler und Bereich des ECE-Weiß nach [WOLF16a]

$$Z = \int_{380nm}^{780nm} \Phi_{e\lambda} \bar{z} d\lambda \quad (2.3)$$

Zur einfacheren Darstellung der wahrgenommenen Farbe werden diese drei Werte normiert, so dass sich die Farbe unabhängig von der Intensität in zwei Dimensionen darstellen lässt. Die derart normierten Intensitätseindrücke werden mit den kleinen Buchstaben x , y und z bezeichnet.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.6)$$

Für die zweidimensionale Darstellung in der sogenannten CIE-Normfarbtafel (Abbildung 2.2) werden die Werte x und y herangezogen, wobei z aus der Normierung

$$x + y + z = 1 \quad (2.7)$$

berechnet werden kann.

Die Spektralfarben, wie sie annähernd durch Laser erzeugt werden können, befinden sich auf einer näherungsweise hufeisenförmigen Kurve in diesem Diagramm. Die Verbindungslinie zwischen den beiden Enden des sichtbaren Spektrums wird als *Purpurgerade* bezeichnet. Der von diesen beiden Kurven eingeschlossene Bereich umfasst alle sichtbaren Farben.

In die Normfarbtafel in Abbildung 2.2 ist außerdem die Kurve der schwarzen Strahler eingezeichnet. Sie symbolisiert die Lichtfarben, die von einem Planck'schen Strahler bei unterschiedlichen Körpertemperaturen abgestrahlt werden. Außerdem ist der Bereich des ECE-Weiß nach [ECE113] eingetragen, innerhalb dessen sich die Lichtfarbe von Fahrzeugscheinwerfern befinden muss (vergleiche Abschnitt 3.1). Dieser Bereich umfasst schwarze Strahler mit Farbtemperaturen von 2250 K bis 6730 K sowie benachbarte Bereiche mit geringfügig größerem oder geringerem Grünanteil im Spektrum.

2.1.2 Helligkeitsempfinden

Für die Helligkeitsbewertung beispielsweise einer Lichtquelle muss unterschieden werden, ob sich das betrachtende menschliche Auge im Bereich des Tag- oder Nachtsehens befindet oder in dem dazwischenliegenden Bereich des Dämmerungssehens. Die Lichtstärke I und alle abgeleiteten Größen wie Lichtstrom Φ , Beleuchtungsstärke E und Leuchtdichte L gelten ausschließlich für das Tagsehen. Für die Berechnung dieser Größen wird definitionsgemäß ausschließlich die \bar{y} -Kurve herangezogen, welche in diesem Fall als $V(\lambda)$ -Funktion bezeichnet wird. Für den Lichtstrom Φ einer Lichtquelle, welche die spektrale Strahlungsleistung $\Phi_{e,\lambda}$ abstrahlt, gilt

$$\Phi = K_m \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda. \quad (2.8)$$

Die Einheit der Lichtstärke I , der in einen bestimmten Raumwinkel Ω abgestrahlte Lichtstrom, ist die SI-Einheit Candela (cd).

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.9)$$

Da bereits die Probandenstudie zur Ermittlung der Tristimuluskurven bzw. deren Auswertung mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist, ist auch die Berechnung des Lichtstroms dieser Ungenauigkeit unterworfen. Die Lichtstrombewertung nach CIE ist jedoch immer noch Stand der Technik.

Die Unterscheidung zwischen Tag-, Dämmerungs- und Nachtsehen erfolgt üblicherweise in Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtungsstärke L_U (Tabelle 2.1). Der für die nächtliche Ausleuchtung des Verkehrsraums relevante Bereich des Dämmerungssehens ist analytisch nicht gut zu erfassen, da sich hier die Empfindlichkeit des Auges je nach einfallender Lichtmenge kontinuierlich verändert [KRÜG13]. Obwohl im eigentlichen Sinne nicht korrekt, wird deswegen auch für Fahrzeugscheinwerfer im Allgemeinen und im Rahmen dieser Arbeit das besser handhabbare Modell des Tagsehens zur Bewertung der lichttechnischen Größen herangezogen.

2.2 Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik

Die folgenden Seiten befassen sich mit dem Zusammenspiel zwischen Lichtquelle und abbildendem optischen Element (Reflektor oder Linse). In Abschnitt 2.2.1 wird der Begriff der Abstrahlcharakteristik einer Lichtquelle erläutert, wobei besonders auf das Modell des Lambertstrahlers eingegangen wird. Mit diesem Modell kann eine angeregte ebene Leuchtstoffschicht sehr gut beschrieben werden, so dass es in Kapitel 5 als Grundlage zur Auslegung von Paraboloidreflektoren dient.

Die Abstrahlcharakteristik einer Lichtquelle ist eine der Größen, welche die Größe eines optischen Systems definiert. Umso größer der Abstrahlwinkel der Lichtquelle ist, desto größer muss auch das optische Element sein, welches das Licht auffangen und umlenken soll. Die beiden weiteren Parameter, welche die Größe des optischen Systems maßgeblich bestimmen, sind der geforderte Abbildungsmaßstab, welcher die Schärfe des Lichtbildes definiert, sowie die Étendue der Lichtquelle, welche eine Erhaltungsgröße der technischen Optik darstellt und den Zusammenhang zwischen der Abstrahlcharakteristik und der Größe einer lichtabstrahlenden Fläche wiedergibt. Auf diese Größen wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

2.2.1 Abstrahlcharakteristik

Die räumliche Abstrahlcharakteristik ebener Lichtquellen, wie beispielsweise dem Großteil weißer LEDs, ähnelt in guter Näherung der eines Lambertstrahlers. Dieses Modell lässt sich anhand einer ebenen Fläche begrenzter Größe A veranschaulichen, von der jeder Punkt in alle Richtungen die gleiche Lichtstärke abstrahlt. Mit Blickrichtung senkrecht zur Fläche erscheint diese aus einiger Entfernung betrachtet in voller Größe. Wird die Fläche nun um einen Winkel ε gedreht, so erscheint sie perspektivisch kleiner. Für die scheinbare Fläche gilt $A' = A \cos \varepsilon$. Da die Lichtstärke, die der Betrachter wahrnimmt, nur von der scheinbaren Größe der Fläche A' abhängt, gilt analog für den in eine bestimmte Richtung abgestrahlte Lichtstärke

$$I = I_0 \cos \varepsilon \quad (2.10)$$

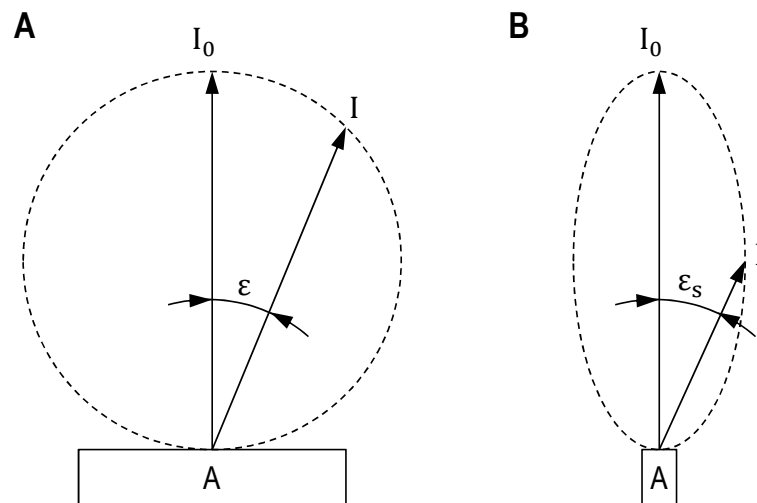


Abbildung 2.3: Abstrahlcharakteristik von Lichtquellen, A) Lambertstrahler, B) Laserdiode

mit I_0 als Bezugslichtstärke, welche normal zur Oberfläche abgestrahlt wird (vergleiche Abbildung 2.3). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.4 dargestellt, wobei die Größe der relativen Lichtstärke den vom Abstrahlwinkel ε abhängigen Quotienten I/I_0 kennzeichnet.

Laserdioden hingegen verfügen über eine sehr kleine abstrahlende Fläche. Aufgrund der photonischen Resonanz im Halbleiterkristall emittieren sie deutlich gerichtet (Abbildung 2.3). Ihr Öffnungswinkel ist jedoch richtungsabhängig und weist parallel zur aktiven Schicht des Halbleiters andere Werte auf als senkrecht dazu.

Die Abkürzung FWHM steht für *Full Width at Half Maximum* und kennzeichnet die Breite des Spektrums bei halber Intensität des Maximums. Häufig wird diese Größe zur Charakterisierung von Wellenlängenspektren und Abstrahlwinkeln genutzt.

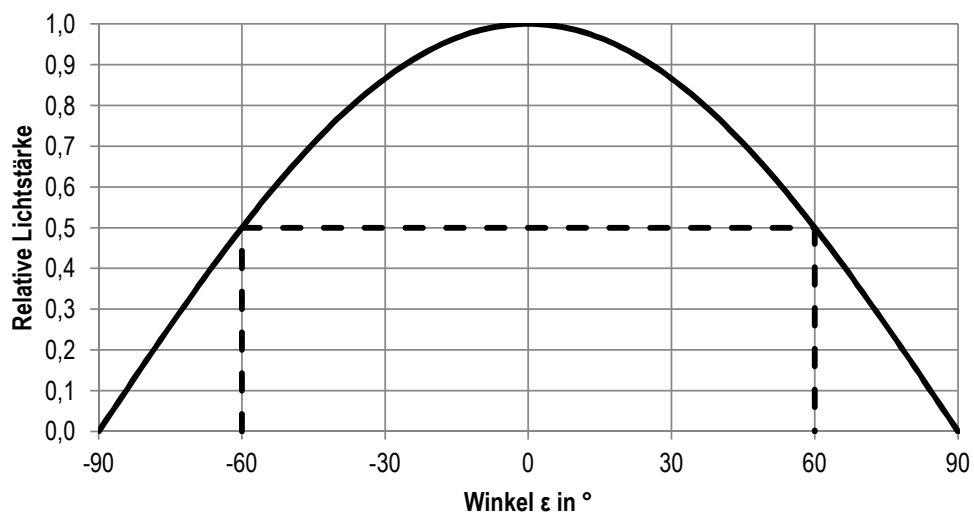


Abbildung 2.4: Abstrahlcharakteristik eines Lambertstrahlers im Fernfeld

Bei einem Lambertstrahler hat die abgestrahlte Lichtstärke unter einem Winkel von $\varepsilon = \pm 60^\circ$ genau die halbe Intensität wie die maximale bei $\varepsilon = 0$ (vergleiche Abbildung 2.4). Die Halbwertsbreite beträgt 120° , was einem Raumwinkel von $\Omega = 1\pi$ entspricht. Für den gesamten, in den 2π -Halbraum abgestrahlten Lichtstrom eines Lambertstrahlers gilt nach Gleichungen 2.9 und 2.10

$$\Phi = \int I d\Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\varepsilon=0}^{\pi/2} I_0 \cos \varepsilon \sin \varepsilon d\varepsilon d\varphi = I_0 \pi. \quad (2.11)$$

Die in den folgenden Abschnitten eingesetzte Laserdiode Osram *PL-TB450B* hingegen weist parallel zur aktiven Schicht eine Halbwertsbreite von 7° auf und senkrecht dazu von $19^\circ \dots 27^\circ$ [OSRA13a].

2.2.2 Abbildungsmaßstab

Der Abbildungsmaßstab ist eine grundlegende Betrachtungsweise, mit der die Abbildungsqualität eines einfachen optischen Systems, bestehend aus einer Lichtquelle und einem optischen Element (Linse oder Reflektor), abgeschätzt werden kann. Diese Betrachtungsweise basiert auf dem Ansatz der Strahlenoptik und vernachlässigt somit Beugungseffekte. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Abbildungsmaßstab als Quotient aus der Größe des Abbildes der Lichtquelle d' und der Größe der Lichtquelle d selbst betrachtet, vergleiche Abbildung 2.5.

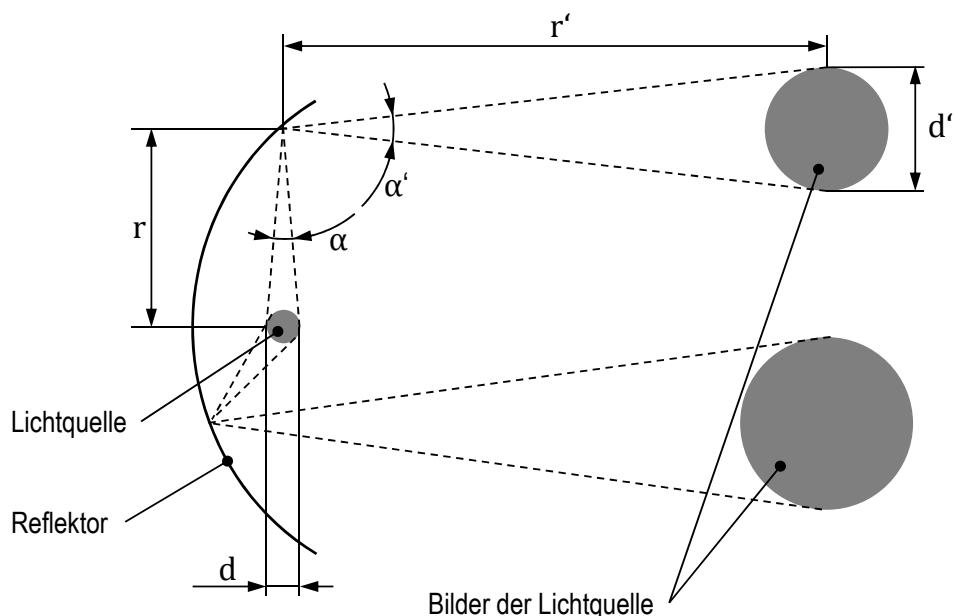


Abbildung 2.5: Wendebilder einer Lichtquelle, [WOLF16a]

Eine endlich große Lichtquelle mit charakteristischer Größe d wird durch ein optisches Element, beispielsweise einen Reflektor, abgebildet. Wird nun eine infinitesimal kleine Stelle des Reflektors betrachtet, so gilt, dass der Öffnungswinkel α des von der Lichtquelle kommenden

Strahlenbündels gleich dem Winkel α' ist, unter dem das reflektierte Strahlenbündel den Reflektor verlässt (vergleiche Abbildung 2.5). Je größer der Abstand r zwischen Lichtquelle und Reflektor ist, desto kleiner wird das Abbild der Lichtquelle d' in einer bestimmten Entfernung r' vom optischen System. Historisch bedingt werden diese Abbilder der Lichtquelle als *Wendebilder* bezeichnet. Folgende Aussagen lassen sich von dieser Betrachtungsweise ableiten:

- Je größer das Verhältnis r/d ist, desto kleiner wird das Abbild der Lichtquelle d' in der Entfernung r' und desto schärfer ist das erzeugte Lichtbild.
- Die maximale Lichtstärke, die mit einem optischen System erzeugt werden kann, ist proportional zum Lichtstrom Φ der Lichtquelle und dem Verhältnis $(r/d)^2$ (was dem Verhältnis aus dem quadrierten Abstand r^2 und der lichtemittierenden Fläche A entspricht).
- Je kleiner der Raumwinkel Ω ist, in den die Lichtquelle Licht emittiert, desto kleiner kann das optische System zum Umlenken des Lichtstroms sein.

Ein geringer Abbildungsmaßstab ist notwendig, um eine scharfe Lichtverteilung erzeugen zu können, wie sie für Abblendscheinwerfer gefordert wird. Zusatzfernlichter zum Erzeugen einer hohen Lichtstärke benötigen ebenfalls einen kleinen Abbildungsmaßstab. Um mit einem kleinen optischen System (Parameter r ist begrenzt) eine solche Lichtverteilung zu erzeugen, muss die eingesetzte Lichtquelle folgende Bedingungen erfüllen:

- Hoher Lichtstrom Φ pro leuchtender Fläche A , hier als große Emissionsleuchtdichte bezeichnet
- Kleine leuchtende Fläche (charakteristische Größe d)
- Kleiner Raumwinkel Ω , in den die Lichtquelle emittiert

Die beiden letzten Punkte lassen sich in einer kleinen Étendue \mathcal{E} der Lichtquelle zusammenfassen.

2.2.3 Étendue

Die Étendue wird bestimmt aus der Größe der lichtemittierenden Fläche A einer Lichtquelle und dem Raumwinkel Ω , in den das Licht emittiert wird. Sie stellt eine Erhaltungsgröße dar, die durch optische Elemente nicht verringert werden kann. Ein ideales optisches System bewahrt die Étendue der Lichtquelle, während sie in realen Systemen vergrößert wird. Es gilt [CHAV08]

$$d\mathcal{E} = n^2 dA \cos \varepsilon d\Omega. \quad (2.12)$$

Ist die Beleuchtungs- beziehungsweise Lichtabstrahlsituation für die gesamte Fläche A konstant und die Brechzahl n des umgebenden Mediums ebenfalls nicht variabel, so gilt [CHAV08]

$$\mathcal{E} = \pi n^2 A \sin^2 \varepsilon. \quad (2.13)$$

Ist das umgebende Medium Luft, so kann in guter Näherung $n = 1$ in die Gleichung eingesetzt werden.

$$\mathcal{E} = \pi A \sin^2 \varepsilon \quad (2.14)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Emissionswinkel ε und dem Emissions-Raumwinkel Ω ist für ein rotationssymmetrisches Abstrahlverhalten der Lichtquelle und $\varepsilon \leq 90^\circ$ über

$$\Omega = 2 \pi (1 - \cos \varepsilon) \quad (2.15)$$

gegeben. Damit ergibt sich die Étendue der Lichtquelle zu

$$\mathcal{E} = A \Omega \left(1 - \frac{\Omega}{4 \pi}\right). \quad (2.16)$$

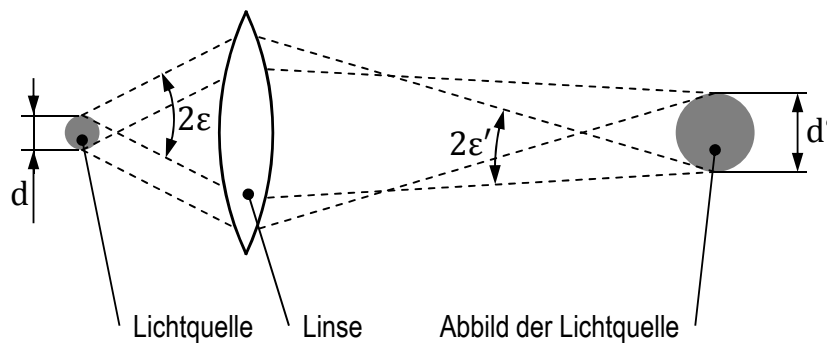


Abbildung 2.6: Erhaltung der Étendue in einem idealen optischen System

In Abbildung 2.6 ist die Abbildung einer Lichtquelle mit Emissionswinkel ε durch eine Linse dargestellt. Es gilt

$$\mathcal{E} = \frac{\pi^2}{4} d^2 \sin^2 \varepsilon \quad (2.17)$$

$$\mathcal{E}' = \frac{\pi^2}{4} d'^2 \sin^2 \varepsilon' \quad (2.18)$$

und mit der Erhaltung der Étendue eines idealen optischen Systems ($\mathcal{E} = \mathcal{E}'$)

$$d^2 \sin^2 \varepsilon = d'^2 \sin^2 \varepsilon' \quad (2.19)$$

$$d \sin \varepsilon = d' \sin \varepsilon'. \quad (2.20)$$

Soll das Licht einer Lichtquelle nun beispielsweise gebündelt werden, so erscheint diese durch das abbildende optische System betrachtet entsprechend vergrößert. Auf der anderen Seite kann das Abbild einer Lichtquelle nur verkleinert werden, indem der Winkel, unter dem sich die Lichtstrahlen ausbreiten, vergrößert wird. Ein Optimum, bestehend aus einem kleinen Abbild der Lichtquelle d' und gut gebündeltem Licht (kleines ε') lässt sich nur realisieren, indem der Öffnungswinkel durch eine Blende begrenzt wird, was gleichbedeutend ist mit einem Verlust an Lichtstrom und dementsprechend den Systemwirkungsgrad reduziert.

Hier liegt der wesentliche Vorteil von Laserdioden. Bedingt durch ihre kleine lichtemittierende Fläche und den engen Abstrahlwinkel weisen sie eine besonders kleine Étendue auf und kommen somit dem Ideal der Punktlichtquelle relativ nah.

3 Grundlagen der Fahrzeugscheinwerfer

Kapitel 3 widmet sich den Grundlagen von Fahrzeugscheinwerfern. Dazu werden im ersten Abschnitt die verschiedenen Funktionen, die aktuelle Fahrzeugscheinwerfer auszeichnen, vorgestellt. Daraus leiten sich die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Anforderungen für Lichtquellen her. Konventionelle Halogenleuchtquellen werden mit Gasentladungssystemen und LED-Modulen verglichen und weißen Laserlichtquellen auf Basis von Laserdioden und Leuchtstoffen gegenübergestellt. In Abschnitt 3.3 werden zunächst grundlegende Reflektorgeometrien dargestellt und anschließend auf den Einsatz in Fahrzeugscheinwerfern übertragen.

3.1 Scheinwerferfunktionen

Fahrzeugscheinwerfer dienen der Ausleuchtung der Fahrbahn und des angrenzenden Verkehrsraums wie beispielsweise Seitenstreifen und Verkehrsschildern. Gleichzeitig machen sie die Größe des eigenen Fahrzeugs für den Gegenverkehr sichtbar. Dabei tragen Scheinwerfer signifikant zum Erscheinungsbild eines Fahrzeugs bei, sowohl nachts als auch tagsüber. Das Ziel eines guten Fahrzeugscheinwerfers ist die Bereitstellung einer auf die aktuelle Fahrsituation angepassten idealen Lichtverteilung.

Fahrzeugscheinwerfer müssen zugelassen sein. Für Europa und viele weitere Länder gelten die Regelungen der ECE, während in den USA die Bestimmungen der SAE gelten. Einige Länder erkennen beide Standards, teilweise mit Einschränkungen, an, oder ergänzen sie durch eigene Bestimmungen [LACH16]. Beispielsweise ist die Farbe der Lichtemission von ECE-zugelassenen Fahrzeugscheinwerfern auf den in Abbildung 2.2 gekennzeichneten Bereich limitiert.

Die folgenden Funktionen von Fahrzeugscheinwerfern sind nach ECE erlaubt bzw. gefordert:

Abblendlicht

Das Abblendlicht stellt die wichtigste Funktion eines Fahrzeugscheinwerfers dar. Es dient der Ausleuchtung der eigenen Fahrspur und angrenzender Bereiche des Verkehrsraums und vermeidet gleichzeitig die Blendung des Gegenverkehrs. Um den vor dem Fahrzeug liegenden Bereich der Straße mit ausreichender Intensität zu beleuchten, ist die Lichtstärke für weit entfernte Teile der Straße hoch. Bereiche in Fahrzeughöhe werden mit geringerer Lichtstärke beleuchtet, um eine gleichmäßige Ausleuchtung der Fahrbahn zu erzielen, ohne dass der Fahrer durch Reflexion des eigenen Lichts geblendet wird. Die

Lichtverteilung des Abblendlichts weist eine markante Hell-Dunkel-Grenze auf, eine definierte Linie, oberhalb der die Lichtstärke deutlich reduziert sein muss, um Gegenverkehr nicht zu blenden. Diese Hell-Dunkel-Grenze verläuft annähernd waagrecht, jedoch darf die eigene Fahrbahn etwas weiter ausgeleuchtet werden als die des Gegenverkehrs. Zur Realisierung der Hell-Dunkel-Grenze sind gute Abbildungsmaßstäbe zwischen Scheinwerfer und Lichtquelle erforderlich, weshalb Reflektoren für Abblendlicht im Regelfall größer sind als Systeme für andere Lichtfunktionen. Gemäß den Regelungen der ECE muss der Teil der Hell-Dunkel-Grenze, der im Bereich des Gegenverkehrs liegt, um $1\% \cong 0,57^\circ$ nach unten weisen. Die Reichweite des Abblendlichts ist somit von der Einbauhöhe im Fahrzeug abhängig. Bei einer typischen Einbauhöhe von $0,6\text{ m}$ ergibt sich eine Reichweite des Abblendlichts von $s = 60\text{ m}$. SUVs hingegen kommen auf eine Reichweite von bis zu 90 m , während der Wert für Sportwagen geringer ausfällt.

Angenommen sei eine Reaktionszeit von $t_R = 0,8\text{ s}$ und eine Bremsverzögerung von $a = 8\text{ m/s}^2$, die etwa der Verzögerung bei einer Gefahrenbremsung auf trockener Fahrbahn entspricht. Mit diesen Werten und der exemplarischen Reichweite des Abblendlichts von 60 m ergibt sich nach

$$v_{max} = \sqrt{(a t_R)^2 + 2 a s} - a t_R \quad (3.1)$$

eine maximale Geschwindigkeit v_{max} von 91 km/h , bei der innerhalb der Reichweite des Scheinwerfers angehalten werden kann. Die Fahrgeschwindigkeit auf Landstraßen ist typischerweise höher. Zu beachten ist ferner, dass die Anbauhöhe von Scheinwerfern beispielsweise bei Sportwagen deutlich niedriger ist, so dass die empfohlene Fahrgeschwindigkeit mit Abblendlicht geringer ist.

Fernlicht

Wie oben beschrieben ermöglicht das Abblendlicht vor allem bei höheren Fahrgeschwindigkeiten keine ausreichende Sichtweite. Fernlicht, das nur außerhalb geschlossener Ortschaften und bei Abwesenheit von Gegenverkehr eingesetzt werden darf, weist keine Hell-Dunkel-Grenze auf. Stattdessen wird sowohl die eigene Fahrbahn als auch die des Gegenverkehrs mit hoher Lichtstärke ausgeleuchtet.

Die Lichtstärke des Fernlichts ist nach ECE-Richtlinie 113 auf 215.000 cd im Hot Spot, dem hellsten Punkt der Lichtverteilung eines Scheinwerfers, begrenzt. Aktuelle Fernlichtscheinwerfer erzeugen jedoch lediglich 110.000 cd . Als Sichtweite wird üblicherweise die Entfernung bezeichnet, welche mit einer Beleuchtungsstärke von $E = 1\text{ lx}$ ausgeleuchtet wird. Zwei exakt eingestellte Fernlichtscheinwerfer, die gemeinsam eine Lichtstärke von $I = 220.000\text{ cd}$ erzeugen, generieren gemäß dem im Fernfeld des Fahrzeugs gültigen quadratischen Abstandsgesetzes eine Sichtweite von

$$s = \sqrt{\frac{I}{E}} = \sqrt{\frac{220.000\text{ cd}}{1\text{ lx}}} = 469\text{ m}. \quad (3.2)$$

Physiologisch sinnvoller ist jedoch das Heranziehen der 4 lx -Grenze zur Definition der Sichtweite, welche dann 235 m beträgt. Fernlichter, welche das gesetzliche Maximum der Lichtstärke ausschöpfen, erzeugen die 1,4-fache Sichtweite von 328 m . Mit den oben ge-

troffenen Annahmen für Reaktionszeit und Bremsverzögerung ergibt sich eine maximale Fahrgeschwindigkeit, mit der innerhalb dieser Sichtweite von 328 m angehalten werden kann, von 239 km/h.

Zusatzfernlicht

Zusatzfernlichter werden nur gemeinsam mit einem klassischen Fernlicht betrieben. Sie dienen dazu die vom Fernlicht erzeugte Lichtstärke näher an das gesetzliche Maximum zu bringen um Sichtweite und Fahrkomfort zu erhöhen. Werden Fern- und Abblendlicht mit Xenonscheinwerfern realisiert, beispielsweise als Bi-Xenon-System, so muss zwangsläufig ein Zusatzfernlicht eingesetzt werden. Die Funktion der Lichthupe kann nicht durch Xenonlichtquellen realisiert werden, da diese hierzu nicht schnell genug angeschaltet werden können. Stattdessen wird das Zusatzfernlicht auf Basis von Halogen- oder LED-Lichtquellen zum kurzzeitigen Aufblenden genutzt.

AFS-Scheinwerfer

Mit AFS-Scheinwerfern (Adaptive Frontlighting Systems) werden zusätzlich zu Abblend- und Fernlicht weitere Lichtverteilungen bereitgestellt, um für verschiedene Fahrsituationen besser geeignete Lichtverteilungen nutzen zu können. Zusätzlich zum Fernlicht sind nach ECE-Richtlinie 123 folgende Lichtverteilungen erlaubt (vergleiche [LACH16]):

- Town Light (Stadtlicht): Das Stadtlicht stellt eine besonders breite Lichtverteilung bereit, um das Erkennen von in der Nähe befindlichen anderen Verkehrsteilnehmern, beispielsweise von Fußgängern, zu verbessern.
- Cross Country Light (Landstraßenlicht): Diese Lichtfunktion entspricht dem klassischen Abblendlicht.
- Motorway Light (Autobahnlicht): Das Autobahnlicht ist stärker fokussiert als das Landstraßenlicht, um die Sichtweite für hohe Fahrgeschwindigkeiten zu erhöhen. Die Breite der Lichtverteilung ist dagegen reduziert.
- Adverse Weather Light (Schlechtwetterlicht): Der eigene Fahrbahnrand wird verstärkt ausgeleuchtet, um das Erkennen des Straßenverlaufs unter schlechten Sichtbedingungen zu verbessern. Gleichzeitig wird die Lichtstärke in den Bereichen zurückgenommen, wo Gegenverkehr, beispielsweise durch Reflexionen an Pfützen, geblendet werden kann.

Die Vielzahl der Funktionen eines AFS-Scheinwerfers können durch den Fahrer nicht sinnvoll angewählt werden, so dass auf Fahrzeugdaten wie Geschwindigkeit, Lenkwinkel und Querbeschleunigung, aber auch auf Kameras zurückgegriffen wird, die den Verkehrsraum erfassen. Ein Vorteil von kamerabasierten, sogenannten assistierenden Lichtsystemen besteht darin, dass diese das Fernlicht häufiger aktivieren als menschliche Fahrer dieses üblicherweise tun und dadurch zum Minimieren von Unfallgefahren beitragen.

Kurvenlicht

Die Sichtweite mit statischen Scheinwerfern ist besonders in Kurven mit kleinem Krüm-

mungsradius stark reduziert. Abhilfe schafft eine Kurvenlichtfunktion, die als statisches oder als dynamisches System ausgeführt werden kann:

- Statisches Kurvenlicht: Bei Kurvenfahrt wird ein zusätzliches, statisches Lichtmodul aktiviert, welches die Kurveninnenseite ausleuchtet. In der Vergangenheit wurden häufig Halogenlichtquellen in Kurvenlichtern eingesetzt, aktuell kommen vermehrt LEDs zum Einsatz.
- Dynamisches Kurvenlicht: Die Hauptscheinwerfer werden in Abhängigkeit des Kurvenradius zur Kurveninnenseite geschwenkt.

Abbieglicht

Abbieglicht dient dem Ausleuchten einer Kreuzung in Richtung des beabsichtigten Abbiegevorgangs und leuchtet deutlich größere Bereiche seitlich des Fahrzeugs aus, als es mit Kurvenlicht der Fall ist. Abbieglicht wird wie statisches Kurvenlicht durch ein zusätzliches Lichtmodul realisiert.

Matrixscheinwerfer

Ein weiterer Schritt in Richtung des optimalen Lichts für jede Fahrsituation gehen Matrixscheinwerfer. Sie teilen die Lichtverteilung in einzelne Segmente auf, die individuell angesteuert werden können. Beispielsweise kann aus der gesamten Fernlichtverteilung der Bereich ausgeblendet werden, in dem sich Gegenverkehr befindet. Hierzu werden Matrixscheinwerfer kamerabasiert angesteuert.

Da mechanisch bewegte Systeme prinzipiell störanfällig sind, sind viele Fahrzeughersteller bestrebt, dynamische Lichtfunktionen durch andere Teillösungen zu realisieren. Aktuelle Matrixscheinwerfer basieren auf individuell ansteuerbaren LEDs [KLEI14]. Erhältlich sind sowohl relativ kostengünstige Systeme mit beispielsweise acht Elementen pro Scheinwerfer im Opel *Astra* [LANG15] als auch Systeme mit deutlich mehr Pixeln. Mercedes bietet aktuell ein System mit 24 individuell ansteuerbaren Lichtsegmenten an und plant eine Erhöhung auf 84 Pixel [BÖKE15].

Hochauflösende Scheinwerfer

Hochauflösende Scheinwerfer, die über mehr als 10.000 Pixel verfügen sollen, befinden sich zurzeit in der Entwicklung. Sie bringen die Funktionalität eines Videoprojektors in den Scheinwerfer und ermöglichen neben einer sehr gezielten Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer auch die Projektion von Informationen auf die Straße sowie das Markieren von Gefahrenstellen [KLOP16b]. Dadurch wird die Blickabwendung vom Verkehrsgeschehen minimiert und die Verkehrssicherheit erhöht. Durch entsprechende Algorithmen ist zudem ein kamerabasiertes Erkennen von Eigenblendung durch Retroreflexion, beispielsweise an zu hell beleuchteten Verkehrsschildern, und ein entsprechendes Abdimmen dieses Bereichs möglich [JÜRG15]. Ebenso kann die Blendung von entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern durch Reflexion an Pfützen erkannt und vermieden werden [FISC15].

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert zwei Projekte, die sich mit der Entwicklung hochauflösender Matrixscheinwerfer befassen: μ AFS, das sich mit der Realisierung einer LED mit 1024 individuell adressierbaren Segmenten be-

fasst [GRÖT15], und VoLiFa2020, wo ein LCD als aktives Element in einem Scheinwerfer mit 30.000 Bildpunkten eingesetzt werden soll [HESS15a], [HESS15b].

An Lichtquellen für hochauflösende Scheinwerfersysteme werden hinsichtlich der Étendue hohe Anforderungen gestellt. Im letzten Kapitel dieser Arbeit wird auf den Einsatz von Laserdioden für diese Systeme eingegangen.

Tagfahrlicht

Tagfahrlicht dient dem Erkennen des Fahrzeugs durch andere Verkehrsteilnehmer, wenn keine andere Scheinwerferfunktion aktiv ist. Die lichttechnischen Anforderungen an Tagfahrleuchten sind vergleichsweise gering, so dass sie gut als stilistisches Element genutzt werden können.

Nebelscheinwerfer

Nebelscheinwerfer dienen bei schlechten Sichtverhältnissen durch Nebel oder Niederschlag der Ausleuchtung der Fahrbahn. Durch ihre tiefe Positionierung an der Fahrzeugfront ist zwar die mit ihnen erzeugte Sichtweite geringer als mit Abblendlicht, dafür wird die Eigenblendung durch angestrahlte und reflektierende Wassertropfen deutlich reduziert.

3.2 Lichtquellen für Fahrzeugscheinwerfer

Umso höher die lichttechnischen Anforderungen an eine Scheinwerferfunktion sind, desto kleiner muss der Abbildungsmaßstab des optischen Systems sein. Eine Lichtquelle mit einer kleinen Étendue ermöglicht eine zulassungskonforme Umsetzung anspruchsvoller Lichtverteilungen wie dem Abblendlicht mit einem kompakten optischen System (vergleiche Abschnitt 2.2.2). Durch den Einsatz einer Lichtquelle, die nur in einen begrenzten Winkelbereich emittiert, kann das optische System noch weiter in seiner Größe reduziert beziehungsweise der Systemwirkungsgrad gesteigert werden. Anschaulich gesprochen muss zur Erzeugung einer scharfen optischen Abbildung das Verhältnis aus der Größe des optischen Systems und der Größe der Lichtquelle (Glühwendel, Gasbogen, LED-Chip) groß sein. Bei konstantem Lichtstrom folgt daraus, dass die Leuchtdichte der Lichtquelle hoch sein muss.

Gleichzeitig muss die Lichtquelle über einen ausreichenden Lichtstrom verfügen. Dieser ist typischerweise deutlich höher als die Lichtmenge, die tatsächlich auf der Straße ankommt. Zum einen weisen Reflektoren und unbeschichtete Linsen Verluste auf, zum anderen wird bauartbedingt nicht alles von der Quelle emittierte Licht von einem optischen System umgelenkt. Die geneigte und gefeilte Abschlusscheibe, die jeden Fahrzeugscheinwerfer vor Umgebungseinflüssen schützt, führt außerdem zu Verlusten durch Fresnelreflexion.

In Tabelle 3.1 sind Kennwerte gängiger Lichtquellen für Fahrzeugscheinwerfer denen von Lichtquellen auf Basis von Laserdiode und Leuchtstoff gegenübergestellt. Als Beispiel für eine Halogenlichtquelle dient hier der Typ H7, Modell *Osram Silverstar 2.0* [OSRA16a]. Die Glühwendel wird mit einer Länge von 4 mm und einem Durchmesser von 1 mm abgeschätzt, die Farb-

Tabelle 3.1: Lichtquellen für Fahrzeugscheinwerfer

Lichtquelle	Halogen (H7)	HID (D2S)	LED
	Osram Silverstar 2.0	Osram Xenarc 66240 XNB	Osram Ostar LE UW U1A5 01
Lichtstrom in lm	1500	3200	2125
Wirkungsgrad in lm/W	27	91	137
Farbtemperatur in K	3200	≤ 4350	6100
Abstrahlraumwinkel in sr	4π	4π	2π
Emissionsfläche in mm^2	4,0	4,0	5,5
Licht pro Fläche in lm/mm^2	375	800	386

Lichtquelle	Laserdiode und Leuchtstoff	
	Versuchsaufbau	Osram μ LARP 1. Generation
Lichtstrom in lm	304	50 / 150
Wirkungsgrad in lm/W	54	36
Farbtemperatur in K	5750	-
Abstrahlraumwinkel in sr	2π	2π
Emissionsfläche in mm^2	0,2 ... 1,0	0,07 / 2,0
Licht pro Fläche in lm/mm^2	304 ... 1520	75 / 714

temperatur mit 3200 K. Eine Glühwendel emittiert hauptsächlich normal zur Mantelfläche dieses einhüllenden Zylinders und erscheint aus dieser Richtung betrachtet $4\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ groß. Zum Vergleich mit den planen Lichtquellen LED und Laserdiode mit Leuchtstoff wird in Tabelle 3.1 dieser Wert für die Emissionsfläche der Halogenlichtquelle eingetragen. Mit dieser Querschnittsfläche und dem Lichtstrom wird die Größe *Licht pro Fläche* bestimmt, die ein Maß dafür ist, wie stark konzentriert das Licht emittiert wird.

Als Beispiel für Xenon-HID-Lampen wird das Modell *Osram Xenarc Night Breaker Unlimited 66240 XNB* betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine Gasentladungslampe vom Typ D2S [OSRA16b]. Der lichtemittierende Gasbogen dieser Lampen ist in etwa so groß wie die Glühwendel einer H7-Lampe, so dass auch hier eine lichtemittierende Fläche von 4 mm^2 als Vergleichsgröße angenommen wird. Beide Lichtquellen strahlen nahezu in den gesamten 4π -Raum ab.

Als Beispiel für eine aktuelle weiße Automotive-LED für Scheinwerfer wird das auf fünf lichtemittierenden Chips basierende Modell *Ostar LE UW U1A5 01* von *Osram* genutzt. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der besten Binning-Kategorie [OSRA15]. Sie strahlt, wie auch die weiteren hier beschriebenen Systeme, in den 2π -Halbraum ab.

Dem gegenübergestellt ist eine beispielhafte Messung eines per Laserdiode angeregten Leuchtstoffs, um das Potential laserbasierter Weißlichtquellen für Scheinwerfer herauszustellen. Die Ergebnisse entsprechen den in Abschnitt 6.2.1 dargestellten des pulverförmigen Leuchtstoffs *NYAG4156-L*, einem Entwicklungsmuster von *Intematix*, das mit einer Laserdiode vom Typ *Osram PL-TB450B* bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Gehäusetemperatur angeregt wird (vergleiche [LACH14c]). Der Leuchtstoff emittiert etwas zu viel grünes Licht, so dass der Farbort der Lichtemission außerhalb des ECE-Weißfeldes liegt. Die angeregte Fläche beträgt etwa 1 mm^2 . Deutlich kleinere Emissionsflächen sind möglich, wobei der Lichtstrom und die davon abhängigen Größen gegebenenfalls durch nichtlineare Effekte reduziert werden. Eine entsprechende Extrapolation ist in der Tabelle angegeben, wobei vereinfachend von einem konstanten Wirkungsgrad des Leuchtstoffs ausgegangen wird. In der Realität wird der Lichtstrom mit Erhöhung der Laserleuchtdichte abnehmen, so dass der angegebene Maximalwert der Lichtemission pro Fläche nicht erreicht wird. Der angegebene Wirkungsgrad basiert auf der elektrischen Leistungsaufnahme der Laserdiode und vernachlässigt die zu ihrer Kühlung benötigte Energie.

Ein kommerzielles Modul aus blauer Laserdiode und Leuchtstoff bietet *Osram* mit dem μLARP seit 2014 an. Dieses Modul der sogenannten ersten Generation basiert auf der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Laserdiode *PL-TB450B* und nutzt einen transmissiven Leuchtstoff. Die Kenngrößen dieses Systems sind ebenfalls in Tabelle 3.1 angegeben. Mit einem Betriebsstrom von $I = 0,9\text{ A}$ liefert es einen Lichtstrom von 150 lm . Fiederling und Hering unterscheiden dabei einen gesamten Lichtemissionsbereich, der $2,0\text{ mm}^2$ groß ist, und einen zentralen Bereich mit einer Größe von $0,07\text{ mm}^2$, der über eine besonders hohe Emissionsleuchtdichte verfügt und einen Lichtstrom von 50 lm abstrahlt. In Tabelle 3.1 sind deswegen beide Werte angegeben [FIED15a]. Die Emissionsleuchtdichte in diesem zentralen Bereich beträgt 714 lm/mm^2 , gemittelt über die gesamte Abstrahlfläche beträgt sie 75 lm/mm^2 . Das weiße Licht, dessen Farbtemperatur nicht genannt wird, wird in einen 2π -Halbraum abgestrahlt. Der Wirkungsgrad des Moduls lässt sich mit dem in Abschnitt 6.1.1 für diesen Betriebspunkt (Gehäusetemperatur der Diode $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, Betriebsstrom $0,9\text{ A}$) ermittelten elektrischen Leistungsaufnahme von $4,19\text{ W}$ auf 36 lm/W bestimmen.

Die ideale Scheinwerferlichtquelle kombiniert einen hohen Lichtstrom pro lichtemittierender Fläche mit einem kleinen Öffnungsraumwinkel. Eine Gasentladungslampe erzeugt den Lichtstrom sehr konzentriert, strahlt ihn jedoch in große Winkelbereiche ab, so dass das optische System zum Umlenken des Lichtstroms entsprechend groß sein muss. Die Leuchtdichte von Hochleistungs-LEDs ist deutlich geringer. Sie erzeugen ähnlich viel Licht pro Fläche wie Halogenleuchtstofflampen, emittieren es jedoch in einen deutlich kleineren Winkelbereich. Das Ziel beim Einsatz von Laserdioden und Leuchtstoffen ist die Kombination der beiden Vorteile hoher Lichtstrom pro Fläche und kleiner Abstrahl-Raumwinkel. Der angeregte Leuchtstoff weist eine mit planen Leuchtstoff-LEDs vergleichbare Abstrahlcharakteristik auf und erlaubt die Lichterzeugung auf sehr kleinen Flächen. Folglich ist auch die Emissionsleuchtdichte laserbasierter Weißlichtquellen hoch. *Osram* beispielsweise gibt eine Leuchtdichte des μLARP von bis zu $L = 511,1\text{ cd/mm}^2$ im Maximum an [FIED15b]. Die Leuchtdichte konventioneller Lichtquellen liegt deutlich darunter. Sie beträgt nach [STRA07] bei 35 W-D2

Gasentladungssystemen 200 cd/mm^2 und bei H7-Halogenlampen, betrieben mit 55 W elektrischer Leistung, 20 cd/mm^2 .

3.3 Reflektoren und optische Systeme für Fahrzeugscheinwerfer

In den folgenden Abschnitten werden Konzepte für optische Reflektoren präsentiert. In Abschnitt 3.3.1 werden dazu zunächst klassische geometrische Reflektoren vorgestellt, die die Grundlage für viele im Fahrzeugumfeld eingesetzte Reflektoren bilden. In Abschnitt 3.3.2 werden darauf aufbauend Scheinwerferkonzepte gezeigt, die in Fahrzeugen zum Einsatz kommen.

3.3.1 Geometrische Grundkörper für Reflektoren

In Tabelle 3.2 wird eine Übersicht über geometrische Grundkörper für optische Reflektoren gegeben. Die Betrachtung fokussiert sich auf Reflektoren zum Sammeln von Licht, wie sie in Scheinwerfersystemen eingesetzt werden. Deshalb wird auf die Darstellung konvexer Systeme zur Lichtstreuung verzichtet. Bei allen Spiegeln, die einen Brennpunkt aufweisen, wird für technische Anwendungen die Lichtquelle im Brennpunkt platziert, wie in Tabelle 3.2 dargestellt. Alle Spiegel werden als ideale optische Systeme betrachtet, so dass die Erhaltung der Étendue nach den Gleichungen 2.19 und 2.20 gilt.

Ebene

Der Planspiegel stellt den einfachsten optischen Spiegel dar. Das Abbild der Lichtquelle A' , welches sich auf der Seite des Spiegels befindet, die der Lichtquelle gegenüberliegt, ist exakt so groß wie die Lichtquelle A selbst. Der Öffnungswinkel Ω , mit dem das Lichtbündel auf den Spiegel trifft, wird mit dem unveränderten Öffnungswinkel $\Omega' = \Omega$ reflektiert. Technisch relevant sind Planspiegel beispielsweise zur Umlenkung fokussierter Lichtstrahlen.

Hyperboloid

Auch bei Hyperboloidspiegeln entsteht ein imaginäres Abbild der Lichtquelle, welches sich auf der anderen Seite des Spiegels befindet. Das Abbild erscheint im Gegensatz zum Planspiegel vergrößert ($A' > A$), wohingegen der Öffnungswinkel des reflektierten Lichts geringer ist als der des einfallenden ($\Omega' < \Omega$).

Paraboloid

Paraboloidreflektoren werden zum Erzeugen nahezu paralleler Lichtbündel mit hoher Licht- bzw. Strahlstärke eingesetzt. Es gilt $\Omega' \ll \Omega$ und analog $A' \gg A$. Exakt paralleles Licht kann nur mit einem Verhältnis aus Größe der Lichtquelle A und Brennweite des Reflektors f_1 von $A/f_1 = 0$ erzeugt werden. Dementsprechend müsste entweder die Lichtquelle unendlich klein oder der Reflektor unendlich groß sein. In der Praxis ist

Tabelle 3.2: Optische Reflektoren

Bezeichnung	Skizze	Brennpunkte	Kegelschnittkonstante
Ebene		$f = -f'$	$k = -\infty$
Hyperboloid		$-\infty < f' < -f$	$-\infty < k < -1$
Paraboloid		$f' = \pm\infty$	$k = -1$
Prolates Ellipsoid		$f < f' < \infty$	$-1 < k < 0$
Kugel		$f = f'$	$k = 0$

die Größe der Reflektoren begrenzt, so dass die Größe des Abbildes der Lichtquelle in endlicher Entfernung ebenfalls limitiert ist.

Prolates Ellipsoid

Das prolates Ellipsoid entsteht durch Rotation einer Ellipse um ihre Hauptachse (große Halbachse) - im Gegensatz zum oblaten Ellipsoid, bei dem die Ellipse um ihre Nebenachse (kleine Halbachse) rotiert wird [KLOO07]. Auf die Betrachtung oblater Ellipsoidspiegel wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, weshalb mit der Bezeichnung Ellipsoid, sofern nicht explizit anders definiert, der prolates Rotationskörper gemeint ist.

Bei prolates Ellipsoidspiegeln gilt $\Omega' < \Omega$. Sie können einen großen Öffnungswinkel einer Lichtquelle von $\Omega > 2\pi$ erfassen, ohne dass die umgelenkten Lichtstrahlen am Austritt gehindert werden. Deswegen eignet sich dieser Reflektortyp sehr gut in Kombination mit Glühwendeln und Gasentladungslampen als Lichtquellen. Das reale Bild der Lichtquelle erscheint vergrößert ($A' > A$).

Kugel

Kugelspiegel bilden eine Lichtquelle auf sich selbst ab. Dabei wird die Größe der Lichtquelle und der Öffnungswinkel des umgelenkten Strahlenbündels nicht verändert. Sie eignen sich beispielsweise zur Begrenzung des Abstrahlwinkels einer Lichtquelle auf $\Omega \geq 2\pi$.

Die aufgeführten Grundformen optischer Reflektoren können als Kegelschnitte betrachtet und durch die Kegelschnittkonstante k klassifiziert werden. Dieser Sichtweise liegt die Gleichung

$$x^2 + y^2 + (z - R)^2 + k z^2 = R^2 \quad (3.3)$$

zu Grunde, welche die Oberfläche des Reflektors beschreibt. Die z -Achse entspricht der optischen Achse des Systems, x und y stellen die weiteren kartesischen Koordinatenachsen und R den Krümmungswert des Reflektors dar [KLOO07]. Die Ebene als Fortsetzung dieser Reihe weist folglich die Kegelschnittkonstante $k = -\infty$ auf.

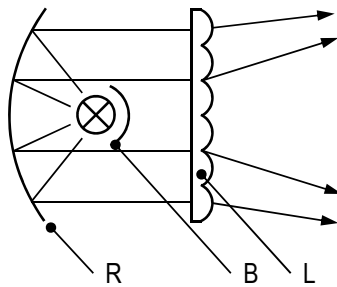
Bei fester Brennweite gilt: Je kleiner (negativer) die Kegelschnittkonstante des Reflektors ist, desto geringer ist der Raumwinkel, den ein Reflektor festen Durchmessers umschließt. Um möglichst viel Licht einer Lichtquelle zu erfassen, ist beispielsweise ein Ellipsoidspiegel besser geeignet als ein Hyperboloidspiegel. Anders betrachtet kann der Spiegel bei gefordertem Erfassungswinkel umso kleiner ausfallen, desto größer die Kegelschnittkonstante ist.

3.3.2 Optische Konzepte für Fahrzeugscheinwerfer

Reflektor mit Streuscheibe

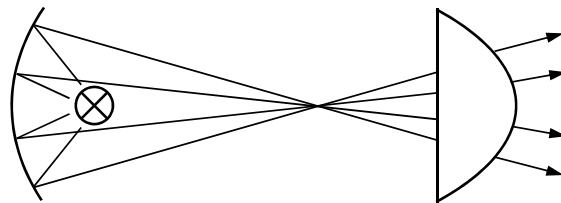
Der historisch betrachtete erste Ansatz zum Erzeugen einer Lichtverteilung basiert auf einem geometrisch einfachen Paraboloidreflektor (R , siehe Abbildung 3.1), der das Licht einer Glühwendel parallelisiert. Um das Lichtbündel nun horizontal aufzuweiten, ohne es vertikal zu beeinflussen, wird eine Streuscheibe (L) als Abschlusscheibe des Systems

A Reflektor mit Streuscheibe

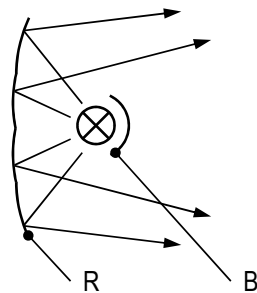


C Projektionsmodul

Horizontaler Schnitt



B Freiformreflektor



Vertikaler Schnitt

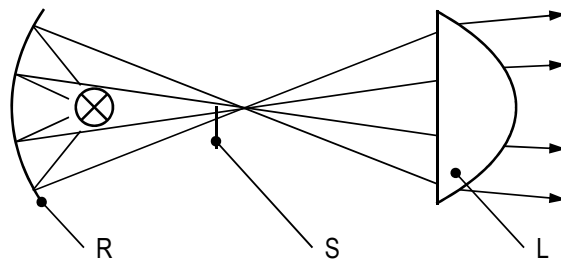


Abbildung 3.1: Konzepte für Fahrzeugscheinwerfer

genutzt, die aus vertikal angeordneten Zylinderlinsen besteht. Zur Erzeugung einer asymmetrischen Abblendlichtverteilung werden die Segmente der Streuscheibe entsprechend angepasst. Eine Abdeckkappe (B), welche typischerweise in den Glaskolben der Lichtquelle integriert ist, fungiert als Blende und verhindert, dass Licht nach vorne aus dem System austritt, welches ansonsten nicht vom Reflektor umgelenkt wird [WÖRD07].

Freiformreflektor

Freiformreflektoren bestehen aus einzelnen Reflektorsegmenten (R), die nebeneinander angeordnet sind. Jedes Reflektorsegment erzeugt dabei einen Teil der gewünschten Lichtverteilung. Die Auslegung dieser Segmente erfolgt computergestützt, da sie keine reinen Ellipsoide, Paraboloiden oder Hyperboloiden darstellen. Die Abschlusscheibe dieser Reflektoren ist plan bzw. folgt der Fahrzeugkontur, so dass sie das Lichtbild, von Fresnelverlusten abgesehen, nicht merklich verändert. Wie bei dem zuerst genannten Scheinwerferkonzept verhindert eine Abdeckkappe (B) die unbeabsichtigte direkte Lichtemission der Lichtquelle [WÖRD07].

Scheinwerfer mit Freiformreflektoren können als *Zweiwendelsystem* gestaltet werden. Die untere Hälfte eines solchen Reflektors wird zum Erzeugen der Abblendlichtverteilung genutzt, beide Hälften zusammen für das Fernlicht. Zum Einsatz kommen Halogenleuchtampen, die über zwei Glühfäden verfügen und unabhängig voneinander betrieben werden können (zum Beispiel der Lampentyp H4). Die Wendel für Abblendlicht ist mit einem zusätzlichen Spiegel versehen, der das Licht, das in die obere Hälfte des Reflektors gelangen würde, in die untere Hälfte lenkt. So wird eine unbeabsichtigte Lichtemission nach oben verhindert. Die Wendel für Fernlicht hingegen ist in einem Abstand zur ersten Wendel platziert und verzichtet auf den zusätzlichen Spiegel. Die Lichtstrahlen,

die von der Fernlichtwendel emittiert werden, treffen deshalb unter anderen Winkeln auf den Reflektor und erzeugen die Fernlichtverteilung.

Projektionsmodul

Die im Jahre 1983 eingeführten Projektionsscheinwerfer nutzen einen Ellipsoidreflektor (R) zum Sammeln des von einer Gasentladungslampe oder Glühwendel abgestrahlten Lichts. Anders als rotationssymmetrische Spiegel weist der hier eingesetzte Ellipsoidspiegel an verschiedenen Stellen verschiedene Positionen des zweiten Brennpunkts auf. Diese Reflektoren werden als *Poly-Ellipsoid Surfaces* (PES) bezeichnet. In Abbildung 3.1 ist ein Reflektor mit unterschiedlicher Brennweite in vertikaler und horizontaler Richtung skizziert. Ein Schatter (S) befindet sich als bewegliche Blende im Strahlengang des Lichts, genau im Brennpunkt der asphärischen Linse (L). Dadurch wird das Abbild des Schatters, welches den beim Abblendlicht abgedunkelten Bereich symbolisiert, in den Verkehrsraum projiziert. Bei geöffnetem Schatter hingegen wird auch Licht nach oben emittiert, so dass eine Fernlichtverteilung entsteht. Durch die unterschiedlichen Brennpunkte des Reflektors kann die Beleuchtung der Schatterebene und somit die Lichtverteilung auf der Straße sehr präzise eingestellt werden [WÖRD07].

Projektionsmodule bieten ähnlich wie Zweiwendelsysteme den Vorteil, dass Abblend- und Fernlicht mit dem selben Modul erzeugt werden können (Bi-Xenon-System, erhältlich seit 1999 [LACH16]). Ein weiterer Vorteil von Projektionsmodulen gegenüber den zuvor genannten Reflektorkonzepten besteht in dem geringeren erforderlichen Durchmesser des optischen Systems. Der Linsendurchmesser liegt zwischen 40 mm und 75 mm [WÖRD07], vergleiche Tabelle 1.1. Dafür ist die Baulänge des Systems gegenüber reinen Reflektorkonzepten erhöht. Der Einsatz der Linse bewirkt Farbfehler im Lichtbild von Projektionsscheinwerfern, welche insbesondere an der Hell-Dunkel-Grenze sichtbar werden.

LED-Systeme

Für LED-Scheinwerfer können eine Vielzahl von optischen Konzepten genutzt werden. Ein großer Vorteil ist, dass planare Hochleistungs-LEDs, wie sie in Fahrzeugscheinwerfern zum Einsatz kommen, einen Abstrahlwinkel von $\Omega = 2\pi$ aufweisen. Im Gegensatz dazu emittieren Glühwendeln und Gasentladungslampen nahezu in den gesamten 4π -Raum.

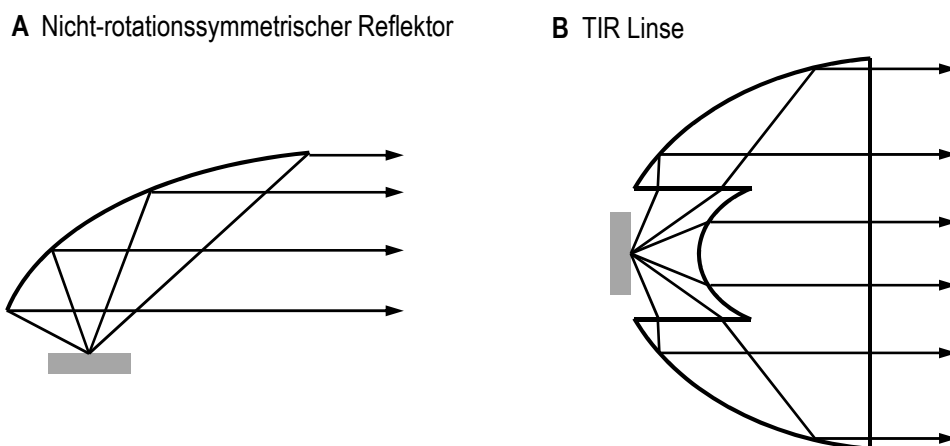


Abbildung 3.2: Konzepte für LED-Scheinwerfer

Zudem strahlen Halbleiterlichtquellen *kalt*es Licht ab, welches keine Infrarotanteile enthält. Dadurch können hitzeempfindliche Kunststoffoptiken in unmittelbarer Nähe zur Lichtquelle eingesetzt werden.

Durch den begrenzten Abstrahlwinkel der Halbleiterlichtquelle lassen sich neuartige Optikkonzepte für Scheinwerfer nutzen. In Abbildung 3.2 A ist ein Reflektor dargestellt, wie er in aktuellen Fahrzeugen Verwendung findet, beispielsweise in den 2015 beziehungsweise 2016 eingeführten Versionen des *VW Tiguan*, *Mazda CX3* und *MX5*. Da die Lichtquelle keine Strahlung in den unteren Halbraum emittiert, kann ein solcher nicht-rotationssymmetrischer Reflektor genutzt werden, um große Teile der Lichtemission umzulenken. In Teil B der Abbildung ist eine TIR-Linse dargestellt, wie sie beispielsweise in Taschenlampen zum Einsatz kommt. Dieses aus einem brechenden Material hergestellte Element wirkt in einem zentralen Teil als Linse. Strahlung, die unter einem größeren Abstrahlwinkel emittiert wird, wird jedoch zunächst an der zylindrischen oder konischen Senkung der Optik gebrochen und anschließend an der Außenfläche mittels Totalreflexion reflektiert. Auf diese Weise kann, von Fresnelverlusten abgesehen, das gesamte von einer LED abgestrahlte Licht umgelenkt werden. Die in der Abbildung rechte Abschlussfläche der Optik kann plan gestaltet werden oder ebenfalls durch Brechung zur Strahlenlenkung beitragen.

4 Einsatz von Laserdioden in der Beleuchtungstechnik

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen zu Laserdioden dargestellt, die dem Ideal einer Punktlichtquelle mit ausgesprochen kleiner Étendue nahe kommen. In Abschnitt 4.2 werden verschiedene Konzepte präsentiert, wie diese Emission in weißes Licht konvertiert werden kann. Nach einer Bewertung der Konzepte wird ein Ansatz ausgewählt, welcher auf Laserdioden und Leuchtstoffen basiert. In Abschnitt 4.3 wird näher auf das Funktionsprinzip und das thermische Verhalten von Leuchtstoffen eingegangen. Letzteres stellt den limitierenden Faktor für die Étendue der laserbasierten Weißlichtquelle dar, was im folgenden Abschnitt betrachtet wird.

4.1 Laserdioden

Ihre erste Erwähnung finden Halbleiterlaser 1961, kurz nach der Realisierung des ersten Lasers überhaupt. Durch ihre kompakte Bauform und geringen Fertigungskosten sind Laserdioden von hohem wirtschaftlichen Interesse. Sie finden beispielsweise in Laserdruckern, optischen Laufwerken (CD, DVD, Bluray) und in der Nachrichtentechnik Einsatz. Im Vergleich zu anderen Lasertypen verfügen Diodenlaser über sehr kleine optische Resonatoren. Dadurch entstehen am Strahlaustritt starke Beugungseffekte, so dass die emittierte Strahlung eine hohe Divergenz aufweist [EICH15].

Laser bestehen aus einem aktiven Medium, welches sich innerhalb eines optischen Resonators befindet. Bei Halbleiterlasern stellen die Außenflächen des Kristalls die teildurchlässigen Reflektorflächen des Resonators dar. Durch einen geeigneten Pumpmechanismus werden Elektronen im aktiven Medium auf ein höheres Energieniveau gehoben. Angeregt durch Photonen, welche im Resonator reflektiert werden, fallen diese Elektronen in einem mehrstufigen Prozess auf ihr Grundniveau zurück und geben dabei elektromagnetische Strahlung ab, die in Frequenz, Phase und Richtung mit der anregenden Strahlung übereinstimmt. Dieser Vorgang wird als *stimulierte Emission* bezeichnet. Hierbei wird die Strahlung im aktiven Medium verstärkt. Damit der Mechanismus der stimulierten Emission funktionieren kann, muss die Verstärkung der Strahlung die Verluste des Systems übersteigen. Deshalb ist im optischen Medium eine gewisse Energiedichte notwendig. Unterhalb dieser sogenannten Laserschwelle emittieren Laserdioden ein Spektrum wie eine LED, darüber ein deutlich schmalbandigeres Laserspektrum, was jedoch breiter ist als das Spektrum anderer Laserbauformen [HANS02].

Die Entwicklung blauer Laserdioden ist maßgeblich von Nakamura geprägt worden [NAKA00]. Aktuell sind blaue Laserdioden ($\lambda \approx 450 \text{ nm}$) mit $1,6 \text{ W}$ optischer Leistung erhältlich [OSRA13a]. Aktuell beträgt der Wirkungsgrad blauer Laserdioden ungefähr 25 %. In naher Zukunft sollen Dioden mit etwa $3,5 \text{ W}$ verfügbar sein.

4.2 Weißlichterzeugung mit Laserdioden

Für den Einsatz in der Beleuchtungstechnik muss das nahezu monochromatische Licht der Laserdioden in weißes Licht gewandelt werden. Dazu können die in Abbildung 4.1 dargestellten Ansätze genutzt werden (vergleiche [LACH14d]):

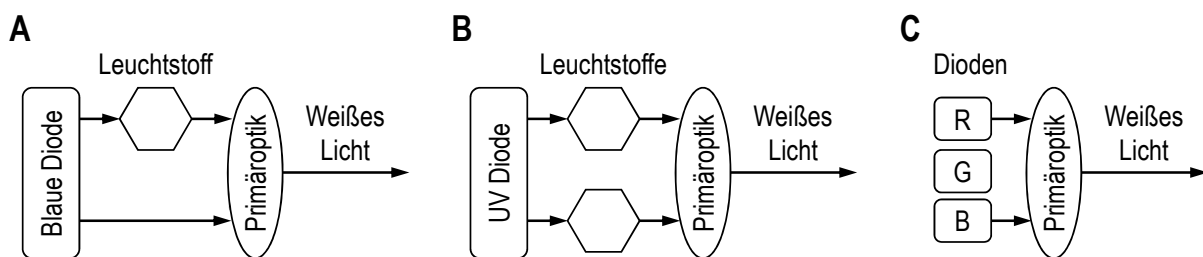


Abbildung 4.1: Möglichkeiten der Weißlichterzeugung mit Laserdioden nach [LACH14a]:

- Kombination aus blauer Diode und breitbandig emittierendem Leuchtstoff,
- Konversion von UV-Licht mittels verschiedener Leuchtstoffe,
- Kombination verschiedener Dioden

A) Blaue Diode mit Leuchtstoff

Die Emissionsfläche einer blauen Laserdiode wird auf einen Leuchtstoff abgebildet, der einen Teil des Laserlichts in gelbes Licht konvertiert und das nicht umgewandelte blaue Licht streut. Der Leuchtstoff tritt als neue Lichtquelle in Erscheinung, dessen abgestrahlte Mischung aus gestreutem blauem und konvertiertem gelbem Licht weiß erscheint. Dieses Prinzip der Umwandlung von blauem Licht zu weißem Licht über einen oder mehrere Leuchtstoffe wird für nahezu alle weißen LEDs angewandt, da es einen guten Wirkungsgrad mit einem hohen Farbwiedergabeindex kombiniert.

Bei LEDs befindet sich der Leuchtstoff in einer polymerischen Vergussmasse oder als Keramik in unmittelbarer Nähe des lichtemittierenden Chips. Für den Einsatz bei Laserdioden werden Leuchtstoff und Diode räumlich voneinander getrennt, was *Remote Phosphor*-Anordnung genannt wird. Dadurch wird die sogenannte Selbstabsorption vermieden, bei der sowohl ein Teil des blauen als auch des gelben Lichts zum Halbleiterkristall zurückgeworfen und von diesem absorbiert wird [HANA13]. Die räumliche Trennung der beiden Wärmequellen Laserdiode und Leuchtstoff reduziert außerdem deren gegenseitiges Aufheizen und verbessert den Wirkungsgrad [KLOP13].

Statt einer blauen Diode kann auch eine im violetten Spektralbereich emittierende Lichtquelle eingesetzt werden. Erdl und Hanafi schlagen in ihrer Offenlegungsschrift die Verwendung einer bei 405 nm emittierenden Laserlichtquelle in Kombination

mit einem Cerium-dotierten Nitrid- oder einem Cerium-dotierten Oxinitrid-Leuchtstoff vor [ERDL13a].

B) UV-Diode mit Leuchtstoffkombination

Ähnlich wie bei Konzept A lässt sich die Emission einer UV-Laserdiode über geeignete Leuchtstoffe zu weißem Licht konvertieren. Bei diesem Ansatz wird jedoch möglichst die gesamte Emissionsstrahlung umgewandelt, so dass die potentiell gefährdende Laserstrahlung nicht zur Beleuchtung beiträgt und deshalb durch geeignete dichroitische oder absorbierende Spektralfilter geblockt werden kann [DENA13]. Allerdings ist bei diesem Ansatz ein im Vergleich zu Konzept A höherer Stokes-Shift nötig, was zu einer höheren thermischen Verlustleistung im Leuchtstoff führt. Zudem muss eine Alterung des Systems durch die ultraviolette Strahlung berücksichtigt werden [JÜST13].

C) Mischung verschiedener Dioden

Als dritte Variante kann die Emission von Laserdioden unterschiedlicher Wellenlängen kombiniert werden, um weißes Licht zu erzeugen. Ein entsprechender Ansatz für einen Fahrzeugscheinwerfer wird von Bony und Mertens beschrieben [BONY12b]. Durch den Verzicht auf ein Konverterelement bleiben die Lasereigenschaften des Lichts gewahrt, so dass die Étendue der Lichtquelle sehr gering ist. Folglich können außerordentlich kleine optische Systeme zum Einsatz kommen. Zur Erzeugung von weißem Licht sind theoretisch zwei Dioden mit unterschiedlicher Wellenlänge notwendig, zum Beispiel eine blaue und eine gelbe, welche über einen dichroitischen Spiegel zu einem Strahl überlagert werden. Soll der Weißton gezielt eingestellt werden, so müssen mindestens drei unterschiedliche Wellenlängen genutzt werden. Der Farbwiedergabeindex der entsprechenden Systeme mit zwei oder drei Emissionswellenlängen ist allerdings sehr gering. Für die Kombination von vier unterschiedlichen Laserdioden wird in der Literatur eine hohe Farbwiedergabe angegeben [NEUM11].

Die Überlagerung verschiedenfarbiger Laserdioden muss sehr präzise geschehen, um im Lichtbild des Scheinwerfers keine farblichen Artefakte zu erzeugen. Alternativ kann ein Homogenisator in den Strahlengang eingebracht werden, der jedoch die vorteilhaft geringe Étendue der Laserdioden vergrößert.

Während im Laufe dieser Arbeit grün emittierende Laserdioden mit einer guten optischen Leistung kommerziell verfügbar wurden, existieren, so weit bekannt, immer noch keine im roten Spektralbereich emittierende Dioden, welche bei Temperaturen deutlich oberhalb der Raumtemperatur genügend Leistung bei ausreichender Strahlqualität emittieren. Für einen Fahrzeugscheinwerfer müssten viele rote Dioden genutzt und überlagert werden, was durch die notwendige Justage ein solches System unpraktikabel erscheinen lässt.

Aktuelle Entwicklungen befassen sich mit RGB-Laserprojektoren, die auf der Überlagerung von rot, grün und blau emittierenden Laserdioden basieren. Durch gezielte Ansteuerung der einzelnen Dioden lassen sich farbige Informationen in den Verkehrsraum projizieren [ROTH14], [ROTH15]. Der für diese Funktion erforderliche Lichtstrom ist im Vergleich zu einem Scheinwerfer gering, so dass deutlich weniger Dioden eingesetzt und justiert werden müssen.

Tabelle 4.1: Bewertung der Konzepte

Konzept	A	B	C
Kleine Étendue der weißen Lichtquelle	2	1	4
Hoher Farbwiedergabeindex	3	4	2
Einfacher Aufbau des Systems	4	3	1
Akzeptanz	3	4	1
Verfügbarkeit der Komponenten	4	2	2
Summe	16	14	10

In Tabelle 4.1 werden die drei Konzepte der Weißlichterzeugung für den Einsatz in einem Zusatzfernlicht bewertet. Jedes Kriterium wird mit null bis vier Punkten bewertet, wobei das jeweils beste Konzept die volle Punktzahl erhält. Null Punkte bedeutet, dass ein Konzept ein Kriterium absolut nicht erfüllt und somit aus der Bewertung ausscheidet.

Wird die Leuchtstoffschicht, wie in den Konzepten A und B, über einen Laser angeregt, so sind verglichen mit LEDs fünffache Leucht- bzw. Strahldichten möglich [LENE14]. In diesem Punkt wird das Konzept B etwas schlechter bewertet als der Ansatz A, da die höhere Verlustleistung des Leuchtstoffs die maximale Bestrahlungsstärke limitiert und somit für das Erzeugen einer kleinen lichtemittierenden Fläche als kritisch angesehen wird. Das Konzept C ermöglicht von allen Ansätzen die kleinste Étendue. Allerdings sind die Anforderungen an die Lasersicherheit durch die direkte Emission der Strahlung vergleichsweise hoch. Dieser Aspekt und die Notwendigkeit, mehrere Laserdioden exakt überlagern zu müssen, erhöhen die Komplexität des Systems.

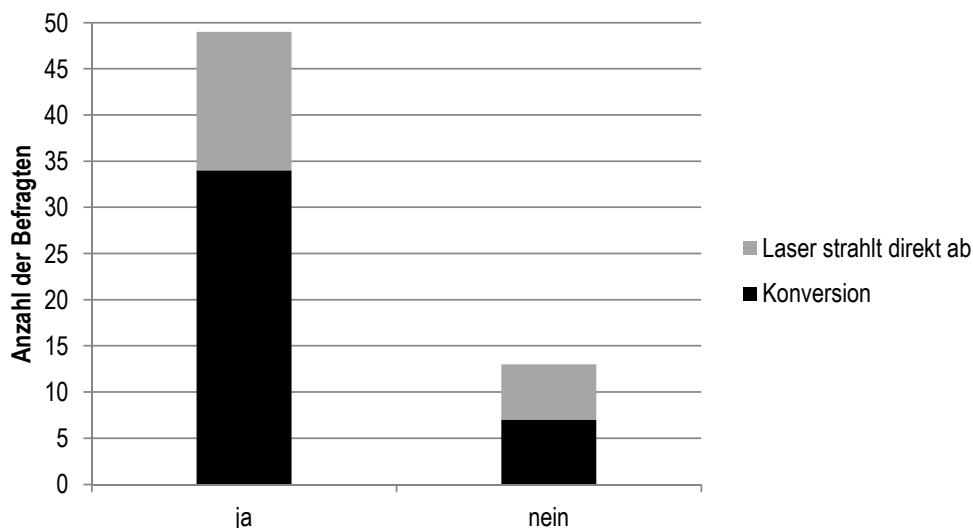


Abbildung 4.2: Umfrage zur Akzeptanz von Laserscheinwerfern nach [GUT15]

Die Frage, in wie weit eine Laserlichtquelle für Kunden als Fahrzeugscheinwerfer akzeptiert wird, hängt nach Gut et al. maßgeblich von der Art der Laseremission ab [GUT15]. Bei der zum Start des Projekts *iLaS* (vergleiche [BERL14]) durchgeführten Befragung unter 62 Teil-

nehmerinnen und Teilnehmern antworteten 49 auf die Frage, ob Sie einen Laserscheinwerfer im Kraftfahrzeug akzeptieren würden, mit ja und 13 mit nein (vergleiche Abbildung 4.2). Von den Befragten, die das Laserlicht akzeptieren, gingen 70 % davon aus, dass das Licht über ein Konverterelement gewandelt wird, was nur 54 % der mit nein antwortenden angenommen haben. Aus diesen Ergebnissen folgern Gut et al., dass das Wissen um den Einsatz eines Leuchtstoffs die Akzeptanz von Laserscheinwerfern steigert. Da bei Konzept B keine Laserstrahlung aus dem System austritt, wird dieser Ansatz beim Punkt *Akzeptanz* mit der höchsten Punktzahl bewertet. Das Konzept A, welches ebenfalls über einen Leuchtstoff verfügt, wird deutlich besser bewertet als das Konzept C.

Für das Konzept A sprechen die gute Verfügbarkeit blauer Hochleistungs-Laserdioden und die akzeptable Verfügbarkeit geeigneter Leuchtstoffe, bei denen auf Entwicklungen für weiße LEDs zurückgegriffen werden kann. Diese Leuchtstoffe weisen einen hohen Wirkungsgrad sowie Farbwiedergabeindex auf und sind somit für den Einsatz in Fahrzeugscheinwerfern gut geeignet. In der Summe schneidet dieser Ansatz am besten ab und wird weiter verfolgt. In den folgenden Abschnitten werden deshalb Leuchtstoffe zur Konversion von blauem zu weißem Licht und das Zusammenspiel von Laserdiode und Leuchtstoff näher betrachtet.

4.3 Leuchtstoffe

Leuchtstoffe sind Feststoffe, die Energie in Licht umwandeln. Sie sind seit dem 10. Jahrhundert in China und Japan bekannt. Um 1600 hat Galilei den *Stein von Bologna* untersucht, der aus Bariumsulfat besteht und Photolumineszenz zeigt. Kirchner hat 1671 herausgefunden, dass nicht Bariumsulfat an sich die Lumineszenz zeigt, sondern dass dafür Verunreinigungen (Dotierungen) im Kristall notwendig sind [JÜST12].

Heutzutage finden Leuchtstoffe eine breite Anwendung. Sie sind Bestandteil von Leuchtstofflampen, werden in Feststofflasern und bei der Röntgenfotografie eingesetzt und dienen als Aufheller in Waschmitteln [BLAS94]. Vor allem kommen Leuchtstoffe in weißen LEDs zum Einsatz, in denen sie blaues Licht des LED-Chips in gelbes Licht konvertieren. Zusammen mit einem nicht konvertierten Teil des blauen Lichts wird weißes Licht abgestrahlt. Blasse und Grabmaier definieren Leuchtstoffe wie folgt:

Definition Leuchtstoff nach [BLAS94]

Ein Leuchtstoff ist ein Feststoff, der bestimmte Arten von Energie in elektromagnetische Strahlung umwandelt, deren Energieniveau oberhalb des Niveaus der thermischen Strahlung liegt. Die Anregung kann durch elektromagnetische Strahlung, Elektronenstrahlung, elektrische Spannung, mechanische Reibung, Röntgenstrahlung, chemische Reaktion oder Weiteres geschehen. Die emittierte Strahlung liegt im für den Menschen sichtbaren Spektralbereich, im Ultravioletten oder im Infraroten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur Anregung durch elektromagnetische Strahlung betrachtet. Leuchtstoffe bestehen aus einem Wirtsmaterial (W) und einer Dotierung mit einem Aktiva-

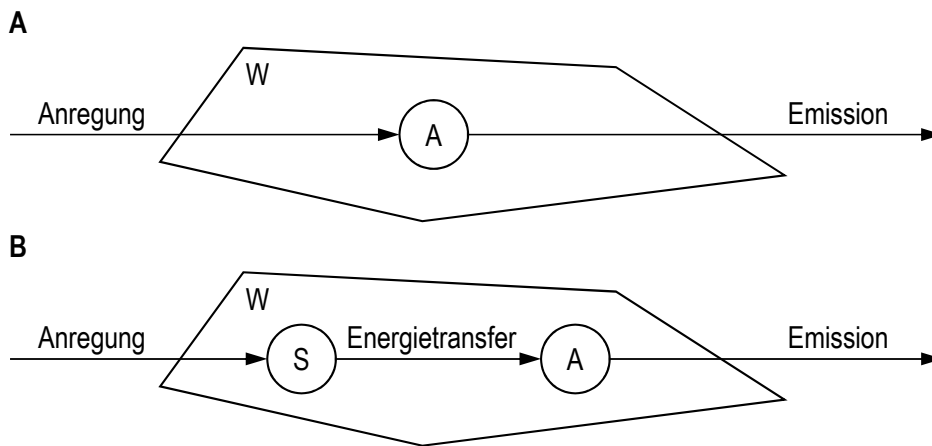


Abbildung 4.3: Lumineszenz von Leuchtstoffen nach [BLAS94]:

- A) Energieabsorption direkt durch Aktivator,
- B) Absorption durch Sensibilisator und Energietransfer zum Aktivator

tor (A), der sogenannte Lumineszenzzentren bildet und die konvertierte Strahlung emittiert (siehe Abbildung 4.3). Gegebenenfalls ist das Wirtsmaterial zusätzlich mit Sensibilisatoren (S) dotiert. Die Absorption der einfallenden Energie kann entweder durch die Aktivatoren an sich, die Sensibilisatoren oder das Wirtsgitter erfolgen. Damit der Aktivator in einen angeregten Zustand übergeht, erfolgt in den beiden zuletzt genannten Fällen eine Energieübertragung vom Sensibilisator bzw. Wirtsgitter auf den Aktivator. Hierbei wird ein Elektron des Aktivators auf ein höheres Energieniveau gehoben. Der Rückfall des Elektrons auf das vorherige Energieniveau erfolgt bei Leuchtstoffen definitionsgemäß durch einen strahlungsbehafteten Übergang. Typischerweise wird dabei nur ein Teil der Energie frei, welcher bei der Anregung aufgenommen wurde [BLAS94]. Die restliche Energie wird als thermische Energie an das Wirtsgitter abgegeben, so dass das emittierte Licht weniger Energie aufweist als die aufgenommene Energiemenge. Handelt es sich bei der Anregungsenergie um elektromagnetische Strahlung, so ist die emittierte Wellenlänge größer als die absorbierte, was als *Stokes-Shift* bezeichnet wird [STOK52] (vergleiche Abbildung 4.4).

Materialabhängig liegt zwischen Absorption und Emission eine bestimmte Zeitspanne. Ist diese Zeitspanne so kurz, dass sie vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen wird, so wird die Lumineszenz auch *Fluoreszenz* genannt. Treten hingegen längere Nachleuchtzeiten auf, wird der Vorgang *Phosphoreszenz* genannt [YEN07].

Abweichend davon gibt es den Mechanismus der *Up-conversion*, bei dem mindestens zwei Photonen ein Elektron eines Aktivators auf ein höheres Energieniveau heben. Hierdurch kann die emittierte Strahlung energiereicher sein als die absorbierte [JÜST14].

Die Verlustprozesse, die in einem Leuchtstoff zur partiellen Löschung der Lumineszenz führen und somit den Wirkungsgrad reduzieren, lassen sich nach Jüstel in drei Kategorien einteilen [JÜST14]:

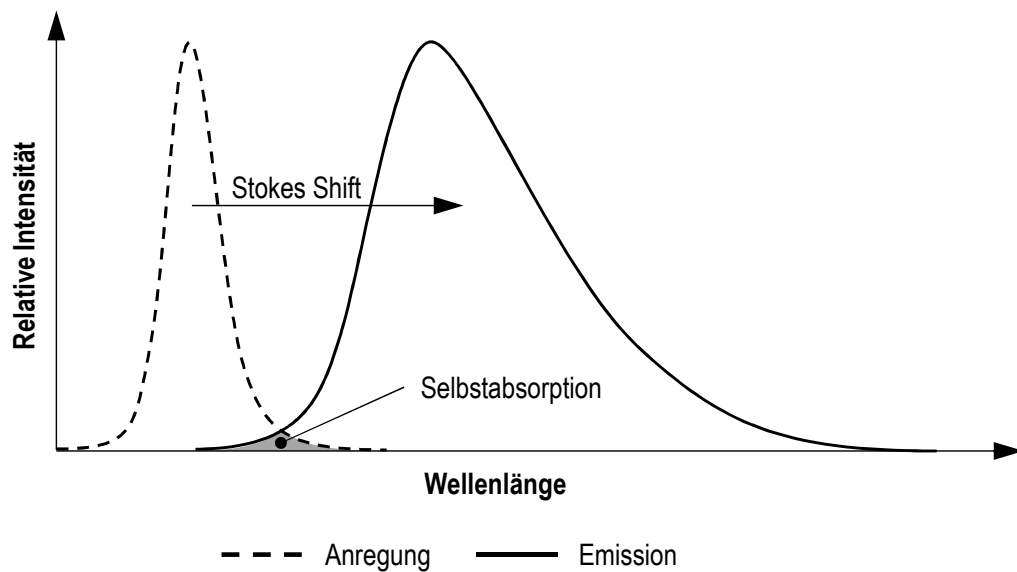


Abbildung 4.4: Beispielhaftes Anregungs- und Emissionsspektrum eines Leuchtstoffs nach [WOLF16c]

Transferverluste

Die absorbierte Energie kommt nicht am Aktivator an, welcher die konvertierte Strahlung emittieren soll. Beispielsweise wird Energie zu Defekten im Kristallgitter oder zu unerwünschten, nicht-lumineszierenden Verunreinigungen im Kristall transferiert. Ein anderer Verlustmechanismus, der zu dieser Kategorie gehört, ist die sogenannte *Excited-State Absorption* (ESA), bei der ein bereits angeregtes Elektron erneut ein Photon absorbiert.

Aktivatorenverluste

Die absorbierte Energie kommt am Aktivator an, jedoch treten vermehrt nicht-strahlende Elektronenübergänge auf.

Emissionsverluste

Die emittierte Strahlung wird durch den Leuchtstoff selbst absorbiert. Eine mögliche Ursache hierfür ist Selbstabsorption. Sie tritt auf, wenn sich Absorptions- und Emissionsspektrum des Leuchtstoffs überlappen, so dass ein Teil der bereits konvertierten Strahlung noch einmal absorbiert und konvertiert werden kann. Eine entsprechende Überlappung ist in Abbildung 4.4 als grauer Bereich dargestellt.

Durch Alterungseffekte des Leuchtstoffs können zudem weitere Absorptionsbande entstehen, die das emittierte Spektrum nachteilig beeinflussen.

In Abbildung 4.5 ist die Wandlung der Energie eines blauen Lasers zu energieärmerer gelber Strahlung einschließlich der Mischung zu weißem Licht vereinfacht dargestellt. Folgende Mechanismen treten dabei auf:

Knoten 1

An der Oberfläche des Leuchtstoffs tritt ein Verlust durch Reflexion in Höhe von etwa 10% auf. Die Höhe des Verlusts ist stark von der Wellenlänge des einstrahlenden Lichts abhängig. Je nach Systemaufbau kann das reflektierte Licht genutzt werden, so dass

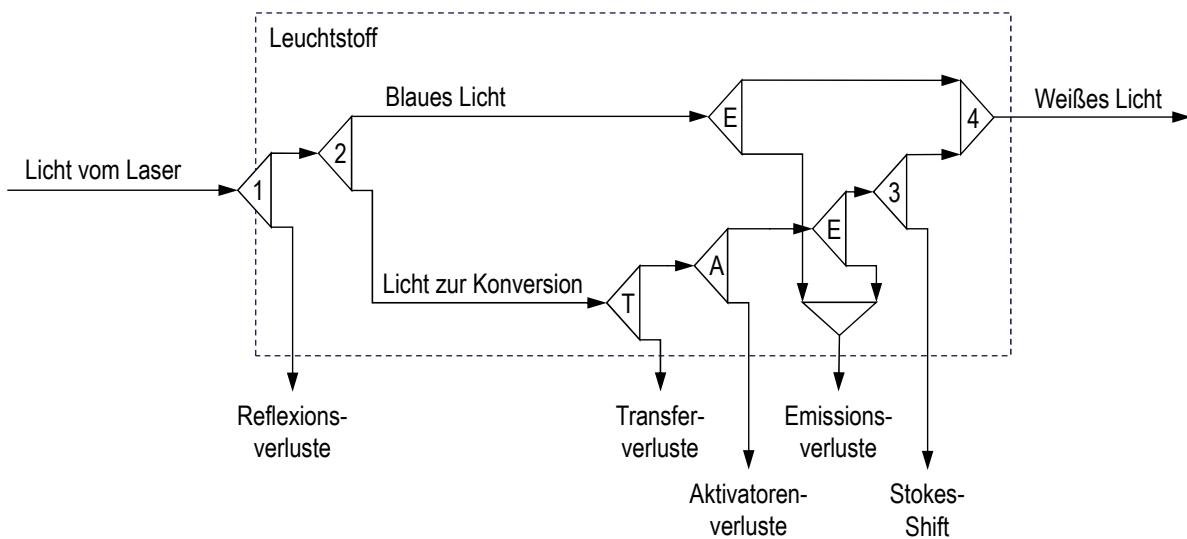


Abbildung 4.5: Verluste bei der Weißlichterzeugung mit einem Leuchtstoff, vereinfachte Darstellung nach [WOLF16a]

es dann nicht als Verlust betrachtet werden muss. Allerdings verschiebt sich dabei der Farbort und das Lichtbild erscheint inhomogen, sofern das reflektierte Licht nicht gut mit dem emittierten Licht durchmischt wird, da das reflektierte Licht die Wellenlänge des Lasers besitzt.

Knoten 2

Ein Teil des blauen Lichts, mit dem der Leuchtstoff angeregt wird, wird unverändert abgegeben. Der andere Teil der eingestrahlenen Photonen soll zu Licht höherer Wellenlänge konvertiert werden. Je höher der Leuchtstoff dotiert ist, desto mehr blaues Licht wird absorbiert. Ebenfalls steigt die Konversionsrate mit der Schichtdicke des Leuchtstoffs an.

Knoten T, A und E

Die oben beschriebenen Mechanismen der Transfer-, Aktivatoren- und Emissionsverluste mindern den Konversionswirkungsgrad. Dabei beziehen sich die Emissionsverluste nicht nur auf die umgewandelte, sondern zum Teil auch auf die nicht konvertierte, blaue Strahlung.

Knoten 3

Der Verlust durch die Wellenlängenkonversion des Lichts beträgt abhängig von der absorbierten Wellenlänge und dem emittierten Spektrum ungefähr 24%. Dieser Verlust durch Stokes Shift steigt sowohl mit dem Reduzieren der Anregungswellenlänge als auch mit einer abnehmenden Farbtemperatur des zu erzeugenden weißen Lichts an. Die Verlustenergie wird in Form von Wärme frei und muss aus dem Leuchtstoff abgeführt werden.

Knoten 4

Das nicht konvertierte blaue Licht und das gelbe Licht werden vom Leuchtstoff gemeinsam als weißes Licht abgestrahlt.

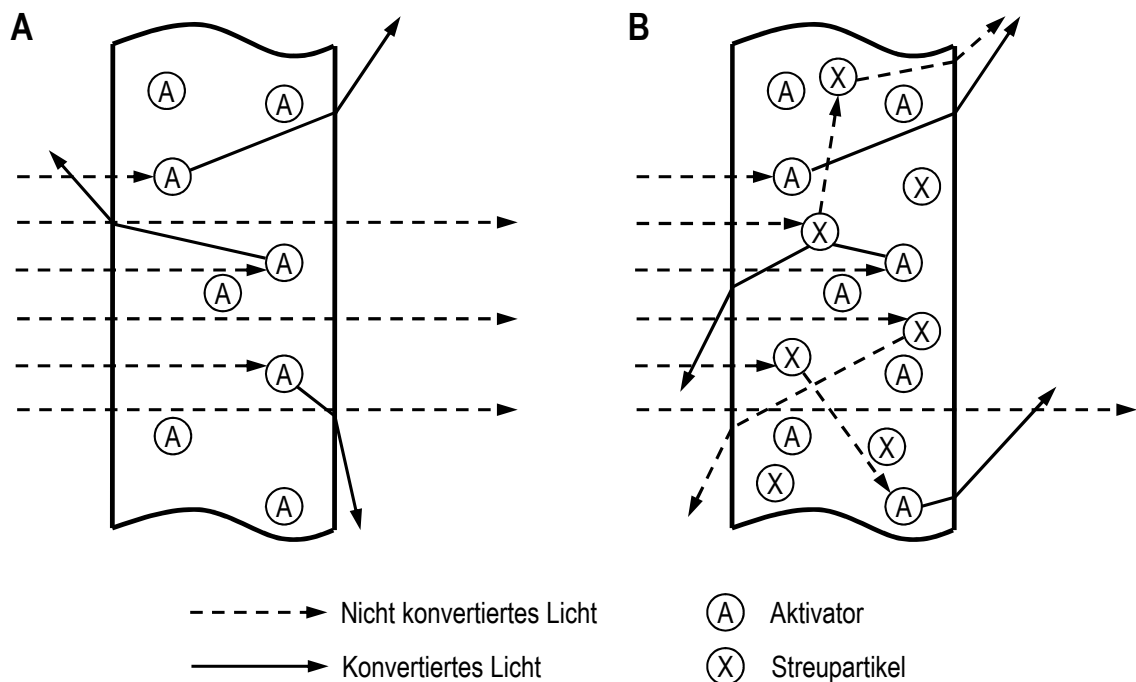


Abbildung 4.6: Konversion und Streuung in einem Leuchtstoff, [WOLF16a]
 A) ohne Streupartikel, B) mit Streupartikeln

Bei dem oben beschriebenen Aufbau des Leuchtstoffs würde der Teil des Laserlichts, der nicht konvertiert wird, in seiner Richtung unverändert abgestrahlt werden. Brechung an den Übergängen Luft-Leuchtstoff und Leuchtstoff-Luft verändert die Richtung dieser Strahlung, was bei ideal planen, dünnen Leuchtstoffen jedoch vernachlässigt werden kann. Eine geringfügige Streuung tritt außerdem an den Korngrenzen gesinterter, polykristalliner Leuchtstoffkeramiken auf. Das konvertierte Licht hingegen wird von den Lumineszenzzentren in beliebige Richtungen, auch nach hinten, abgestrahlt und ebenfalls beim Austritt aus dem Leuchtstoff gebrochen. Die Folge ist, dass der Leuchtstoff nach vorne fast nur blaues und seitlich ausschließlich gelbes Licht abstrahlt und deshalb für die meisten Anwendungsfälle nicht einsetzbar ist. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.6 A am Beispiel eines transmissiv eingesetzten Leuchtstoffs dargestellt. Um das nicht konvertierte Licht zu streuen und somit der Abstrahlcharakteristik des konvertierten Lichts anzugleichen, können Streupartikel in den Leuchtstoff eingebracht werden (Abbildung 4.6 B).

Um eine gleichmäßige Lichtemission zu erhalten, muss die passende Konzentration an Streupartikeln, die von der Schichtdicke des Leuchtstoffs abhängt, in das Material eingebracht werden. Zu wenig Streupartikel führen zu vermehrter Emission nicht umgelenkten blauen Lichts. Werden hingegen zu viele Streupartikel eingesetzt, so wird die Fläche, von welcher der Leuchtstoff Strahlung emittiert, zu stark vergrößert (vergleiche Abbildung 4.6 B). Bei transmissiv eingesetzten Leuchtstoffen führt eine hohe Konzentration von Streupartikeln nach Schug et al. zudem zu einer vermehrten, unerwünschten Lichtemission auf der Anregungsseite [SCHU14].

Mögliche Farborte eines Leuchtstoffs, um ein nach Regelung 113 ECE-konformes Weiß zu erzeugen, sind in Abbildung 4.7 eingetragen. Der Farbort des Leuchtstoffs muss sich dazu, vom

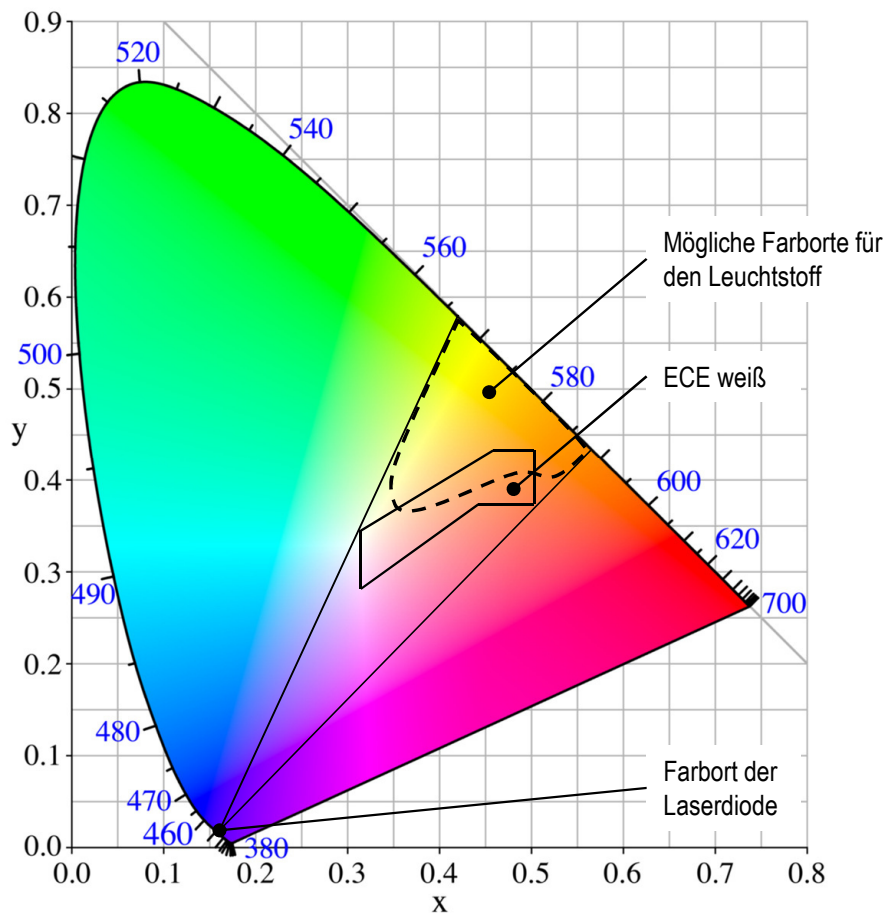


Abbildung 4.7: Farborte von Leuchtstoffen zur Erzeugung ECE-konformen weißen Lichts nach [KLOP15]

ECE-Weißraum aus betrachtet, auf der gegenüberliegenden Seite des Farborts der anregenden Laserdiode befinden.

Systeme mit einem Leuchtstoff sind primär geeignet, um kaltweies Licht zu erzeugen. Zum Generieren von warmweiem Licht wird typischerweise ein weiterer Leuchtstoff, der im roten Spektralbereich emittiert, hinzugefügt [JST13].

4.3.1 Der Leuchtstoff YAG:Ce

Im Rahmen dieser Arbeit wird hauptsächlich der Leuchtstoff YAG:Ce betrachtet, der beispielsweise für weiße LEDs eingesetzt wird. Er verfügt über sehr gute thermische Eigenschaften und ist deswegen für den Einsatz bei großen Energiedichten besser geeignet als viele andere Leuchtstoffe. YAG:Ce (Yttrium-Aluminium-Granat $Y_3Al_5O_{12}$ dotiert mit dreiwertigem Cer) ist ein kubisch-raumzentrierter Kristall [XU99], der bei Beleuchtung mit weißem Licht gelb erscheint. Als solcher ist er optisch isotrop, er weist - auch lichttechnisch gesehen - keine Vorzugsrichtung auf [LENE13]. Die Brechzahl des Kristalls liegt bei $n \approx 1,8$ und ist in geringem Maße von der Höhe der Dotierung mit Cer abhängig.

YAG:Ce verfügt über keine Sensibilisatoren. Statt dessen wird, wie in Abbildung 4.3 A) dargestellt, die Anregungsstrahlung direkt von den Aktivatoren, in diesem Fall den Cer-Ionen absorbiert.

YAG:Ce verfügt über zwei ausgeprägte Absorptionsbereiche für kurzwelliges Licht. Zum einen kann eine Anregung mit UV-A-Strahlung von 320 nm erfolgen, zum anderen mit sichtbarem blauen Licht (450 nm). Die Anregung mit UV-A-Licht ist geringfügig effektiver als die mit sichtbarem Licht und führt zu einer stärkeren Emission von Photonen (vergleiche Abbildung 4.8). Allerdings ist der Energieverlust durch Stokes-Shift und die deshalb aus dem Leuchtstoff abzuführende Wärmemenge bei Anregung mit UV-Licht deutlich höher als beim Nutzen von blauem Licht, so dass Letzteres bevorzugt wird.

Ein weiteres Absorptionsband kann bei Wellenlängen unterhalb von 300 nm ausgemacht werden. Der Kristall weist außerdem ein interessantes Reflexionsverhalten auf. Die Wellenlängen, die vom Leuchtstoff absorbiert werden, werden dementsprechend kaum reflektiert. Die Emission umschließt den Bereich von 460 nm bis über 800 nm hinaus. Im Bereich um 500 nm tritt Selbstabsorption auf. Eine Erhöhung der Cer-Konzentration führt zu einer Rotverschiebung der Emission. Das Maximum der Emission befindet sich bei einer Ce^{3+} -Konzentration von $0,033\%$ bei 536 nm und verschiebt sich auf 558 nm bei $3,33\%$ Cer, jeweils bei Raumtemperatur [BACH07], [BACH09].

Die typische Nachleuchtzeit von YAG:Ce beträgt etwa 65 ns [JÜST12]. Das entspricht einer Frequenz von $15,4\text{ MHz}$, mit welcher der Leuchtstoff vom emittierenden in den nicht emittierenden Zustand umgeschaltet werden kann. Somit ist die Nutzung von YAG:Ce auch für Anwendungen möglich, die eine sehr hohe Schaltfrequenz benötigen, wie beispielsweise dem in Abschnitt 7.2 vorgestellten Laserscanner.

Die thermische Leitfähigkeit des YAG-Kristalls ist stark temperaturabhängig (vergleiche Tabelle 4.2). Für eine polykristalline YAG:Nd-Keramik, die typischerweise als Lasermedium eingesetzt wird, beträgt die thermische Leitfähigkeit bei 200 °C noch $65,4\%$ und bei 600 °C noch $44,2\%$ vom Wert bei 20 °C [IKES06]. Die thermische Leitfähigkeit einer gesinterten, Cer-dotierten Leuchtstoffkeramik wird in der Literatur als vergleichbar angenommen [LENE13].

Tabelle 4.2: Wärmeleitfähigkeit von Leuchtstoffträgern

Material	Wärmeleitfähigkeit in $W/(m \cdot K)$	Einsatzbereich
YAG-Keramik	5 ... 13	reflektiv, transmissiv
Saphirglas	42	transmissiv
Aluminium	235	reflektiv

Bedingt durch die Verlustmechanismen wie beispielsweise den Stokes-Shift erwärmt sich der Leuchtstoff im Betrieb. In Kombination mit der vergleichsweise geringen Temperaturleitfähigkeit der Keramik führt eine Anregung mit hoher Energiedichte somit zu einer starken lokalen Erwärmung des Leuchtstoffs. Erreicht die Temperatur der Leuchtstoffkeramik die sogenannte

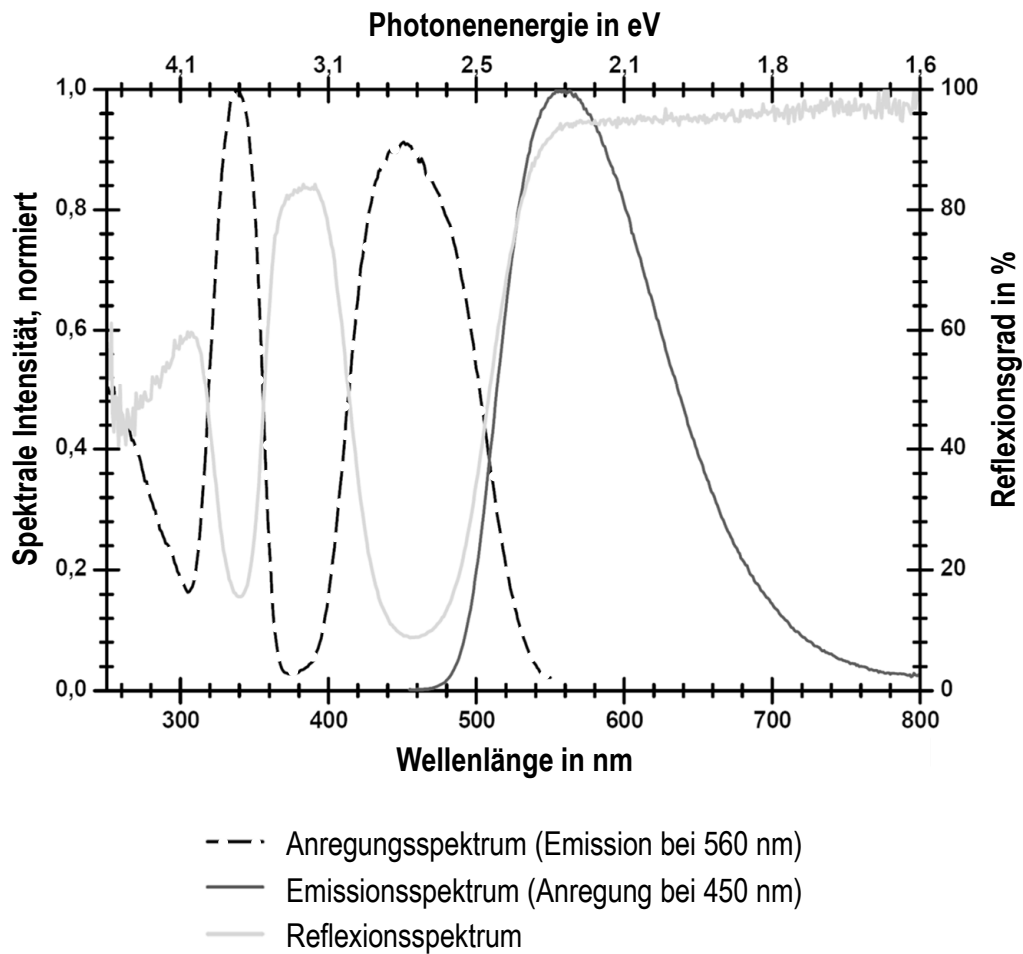


Abbildung 4.8: Absorptions- und Emissionsspektrum von YAG:Ce nach [TAIL12]

Quenchingtemperatur, so bricht die Umwandlungseffizienz stark ein. Dieser Zusammenhang wird in Abschnitt 4.3.2 näher betrachtet.

Zur Verbesserung der Temperaturleitfähigkeit kann der Leuchtstoff auf ein gut leitendes Trägermaterial appliziert werden. Für Anwendungen, bei denen Anregung und Emission von der gleichen Seite erfolgen können, bietet sich Aluminium als Trägermaterial an. Außer einer hohen Temperaturleitfähigkeit weist es eine gute Reflektivität für sichtbares Licht auf, so dass es Licht, welches in Richtung des Trägermaterials emittiert wird, reflektiert und dadurch nutzbar macht. Der dadurch verlängerte Weg der Photonen durch die Keramik muss für die notwendige Dotierung des Leuchtstoffs und die benötigte Konzentration an Streupartikeln berücksichtigt werden. Die Anregung des Leuchtstoffs erfolgt zwangsweise an der dem Träger abgewandten Seite. Am Ort der Bestrahlung entsteht lokal die größte Wärme. Hier ist die Dichte unkonvertierter Photonen am höchsten. Je weiter der Laserstrahl in den Leuchtstoff eindringt, desto mehr nimmt seine Intensität durch Umwandlung an Aktivatoren und Streuung an Streupartikeln ab. Die größte Umwandlungsrate tritt folglich dort auf, wo der Laserstrahl mit hoher Energiedichte auf den Leuchtstoff trifft. Die dabei erzeugte Wärme muss durch eine Schicht aus vergleichsweise schlecht leitender Keramik bis zum Trägermaterial transportiert werden.

Deshalb sollte, um die Wärmeleitfähigkeit des Trägermaterials optimal zu nutzen, die keramische Leuchtstoffschicht möglichst dünn sein.

Sollen Anregung und Emission auf unterschiedlichen Seiten erfolgen, so eignet sich Saphirglas als Trägermaterial. Die Wärmeleitfähigkeit dieses Werkstoffs liegt jedoch deutlich unterhalb der von Aluminium. Beim Einsatz des transparenten Saphirglases empfiehlt sich eine Anregung durch das Trägermaterial hindurch. So befindet sich der Ort höchster Wärmeentstehung in der Nähe des vergleichsweise gut leitenden Trägermaterials.

4.3.2 Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrads

Der hauptsächliche Mechanismus, der die Konversionseffizienz eines Leuchtstoffs mit steigender Temperatur herabsetzt, ist das *Thermal Quenching* (Thermische Löschung). In Abbildung 4.9 sind die konvertierte Strahlungsleistung und Leuchtstofftemperatur im lokalen Maximum einer transmissiv eingesetzten YAG:Ce-Probe dargestellt, die bei hohen Laserleistungen Quenching zeigt.

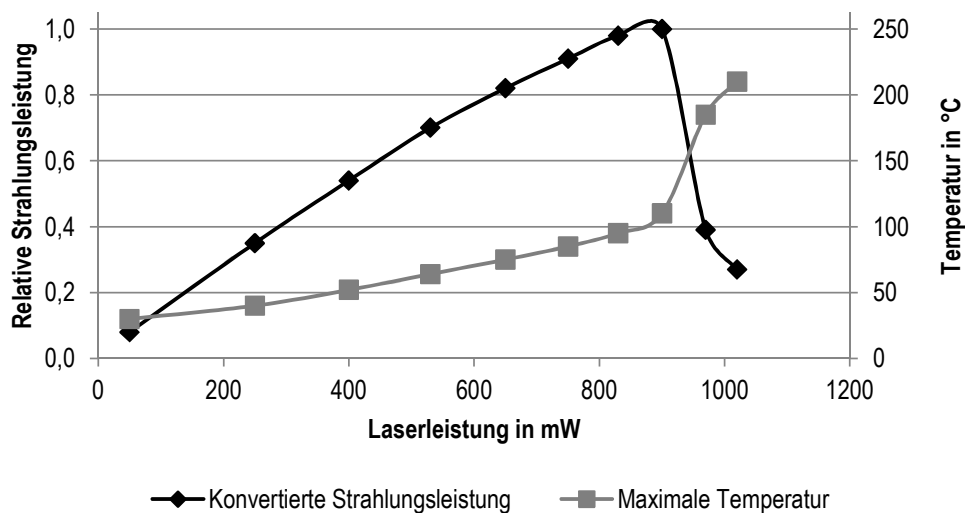


Abbildung 4.9: Konvertierte Strahlungsleistung und Temperatur eines Leuchtstoffs in Abhängigkeit der Laserleistung nach [TAPP13]

Diese Messungen von Tappe et al. finden jeweils im thermischen Gleichgewicht statt [TAPP13]. Während die Temperatur des Leuchtstoffs im dargestellten Versuch bis zu einer Laserleistung von etwa 900 mW nur leicht überproportional mit der Laserleistung zunimmt, so ist bei höheren Leistungen ein sprunghafter Temperaturanstieg zu verzeichnen. Die umgewandelte Strahlungsleistung verhält sich exakt entgegengesetzt. Bis zur kritischen Leistungsdichte steigt die abgestrahlte Leistung fast linear mit der Bestrahlungsleistung an und bricht dann abrupt ein.

Je stärker die Probe bestrahlt wird, desto mehr Photonen werden umgewandelt und desto mehr Wärme entsteht als Folge davon. Da der Leuchtstoff nur über eine begrenzte Wärmeleitfähigkeit verfügt, steigt dessen Temperatur an. Zwei Effekte bewirken allerdings einen

überproportionalen Anstieg der Temperatur. Zum einen nimmt die Wärmeleitfähigkeit des Leuchtstoffs mit steigender Temperatur deutlich ab, zum anderen sinkt gleichzeitig der Konversionswirkungsgrad. Bei diesem als Thermal Quenching bezeichneten Verhalten wird zwar noch Strahlung absorbiert, diese wird jedoch vermehrt in Wärme statt in Photonen umgesetzt. Bei einer Anregungsleistung von in diesem Fall ungefähr 900 mW bricht die abgestrahlte Leistung ein, die kritische Quenchingtemperatur des Leuchtstoffs ist überschritten. Aus Mangel an weiteren Messpunkten kann sie gemäß Abbildung 4.9 nur auf den Bereich zwischen $110\text{ }^\circ\text{C}$ und $180\text{ }^\circ\text{C}$ eingegrenzt werden.

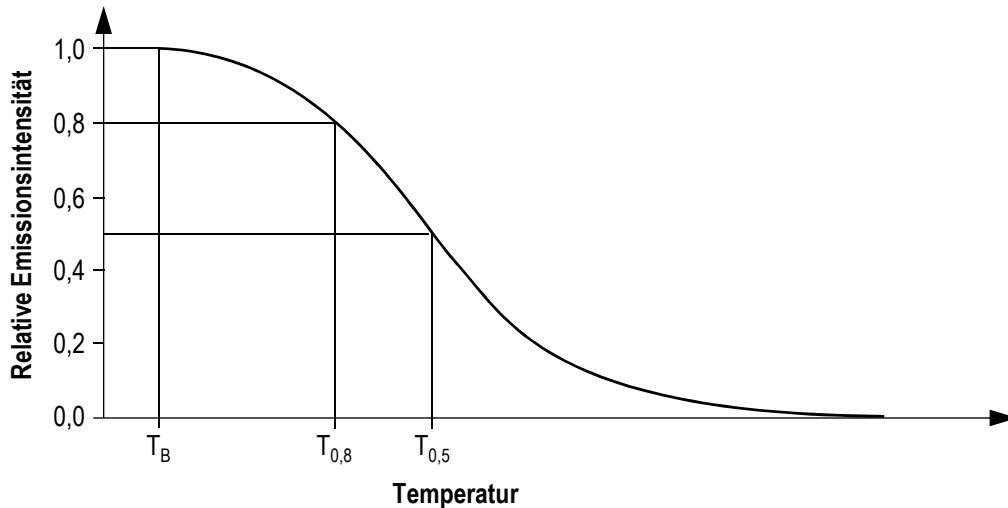


Abbildung 4.10: Thermal Quenching eines Leuchtstoffs nach [JÜST14]

In Abbildung 4.10 ist die typische Löschkurve eines Leuchtstoffs dargestellt. Ausgehend von der Bezugstemperatur T_B nimmt die Emissionsintensität des Konvertermaterials mit steigender Temperatur ab. Je nach Material des Leuchtstoffs und Grad der Dotierung kann der Rückgang des Wirkungsgrads bereits bei Überschreiten der Raumtemperatur signifikant sein. Zum Charakterisieren des thermischen Verhaltens wird die sogenannte *Quenchingtemperatur* $T_{0,5}$ oder $T_{0,8}$ genutzt. Sie gibt die Temperatur an, bei der die Emission des Leuchtstoffs auf 50 % bzw. 80 % der Emission bei Bezugstemperatur fällt.

Tabelle 4.3: Quenchingtemperaturen $T_{0,8}$ und $T_{0,5}$ in Abhängigkeit der Cer-Konzentration bei Anregung mit 450 nm , ungefähre Werte nach [BACH07]

Cer-Konzentration in %	0,033	0,33	1,00	3,33
Quenchingtemperatur $T_{0,8}$ in $^\circ\text{C}$	135	175	145	155
Quenchingtemperatur $T_{0,5}$ in $^\circ\text{C}$	305	325	275	245

Für einzelne, isolierte Cer-Ionen im YAG-Kristall kann eine Quenchingtemperatur von über $405\text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt werden [BACH07]. Für praktische Anwendungen als Leuchtstoff wird der Wirtskristall jedoch höher dotiert, was die Absorption der Anregungsstrahlung verbessert und dadurch höhere Leuchtdichten bzw. dünnere Leuchtstoffschichten ermöglicht. Allerdings hat die Erhöhung der Cer-Konzentration eine signifikante Verringerung der Quenchingtemperatur zur Folge. In Tabelle 4.3 sind die Quenchingtemperaturen $T_{0,5}$ und $T_{0,8}$ angegeben, wobei die

Raumtemperatur als Bezug T_B gilt. Da bereits ein geringfügiger Rückgang der Emission des Leuchtstoffs das Verhältnis von reflektiertem blauen und umgewandeltem gelben Licht sichtbar verändert, wird die niedrigere Löschungstemperatur $T_{0,8}$ als relevanter Grenzwert für den Einsatz in Fahrzeugscheinwerfern herangezogen. Für geringe und mäßige Cer-Konzentrationen ist die thermische Löschung stark von der Anregungswellenlänge abhängig. Bei einer Konzentration von 3,33 % ist diese Abhängigkeit kaum mehr vorhanden.

Für den Einsatz als weiße Laserlichtquelle sind Cer-Konzentrationen im Bereich von 2 % bis 3 % sinnvoll. Um große Einbußen im Konversionswirkungsgrad zu vermeiden sollte folglich eine Leuchtstofftemperatur von 155°C nicht überschritten werden.

Mit steigender Temperatur wird die Emission des Leuchtstoffs breitbandiger. Als Folge dessen nimmt die Überlappung zwischen Absorptions- und Emissionsband mit steigender Temperatur zu, so dass vermehrt Selbstabsorption auftritt. Das bedeutet, dass der Teil des bereits umgewandelten Lichts, das bei einer Wellenlänge von etwa 500 nm emittiert wird, erneut absorbiert werden kann (vergleiche Abbildung 4.4). Eine steigende Selbstabsorption vermindert die Emission des Leuchtstoffs im Überlappungsbereich von Absorptions- und Emissionsspektrum und führt somit zu einer Rotverschiebung der Emission.

4.3.3 Einfluss der Bestrahlungsstärke

Wird der Leuchtstoff einer hohen Bestrahlungsstärke ausgesetzt, stehen zunehmend weniger Aktivator-Elektronen auf einem niedrigen Energieniveau zur Verfügung, welche das einfallende Licht absorbieren und dadurch auf ein höheres Energieniveau angehoben werden können. Dadurch ist die Leuchtdichte, die mit einem Leuchtstoff erzeugt werden kann, begrenzt. Durch Erhöhung der Leuchtstoffschichtstärke bzw. Anpassung weiterer geometrischer Parameter kann dem begrenzt entgegengewirkt werden (vergleiche [LENE13]).

Außerdem treten bei starker Anregung des YAG:Ce-Leuchtstoffs vermehrt nichtlineare Effekte auf. In einem stark bestrahlten Kristall befinden sich viele Elektronen in einem angeregten Zustand, die durch weitere Energiezufuhr in das Leitungsband gehoben werden, anstatt beim Zurückfallen auf ein niedrigeres Energieniveau Licht zu emittieren. Dieser Effekt wird *Excited-State Absorption* (ESA) genannt. Die hierzu benötigte Energie kann sowohl von der Anregungslichtquelle als auch von bereits konvertierten Photonen herrühren [LENE13].

4.4 Lichtquellen auf Basis von Laserdioden und Leuchtstoffen

In den folgenden Abschnitten werden die Étendue des angeregten Leuchtstoffs und der Wirkungsgrad einer Lichtquelle bestehend aus elektrischer Ansteuerung, Laserdiode und Leuchtstoff betrachtet. Der Wirkungsgrad des optischen Systems, in dem die Lichtquelle zum Einsatz kommt, und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges werden zudem berücksichtigt.

4.4.1 Étendue eines angeregten Leuchtstoffs

Wie in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 hergeleitet, stellt eine Punktlichtquelle die optimale Lichtquelle für einen Scheinwerfer dar. Sie ermöglicht die Nutzung eines ideal kleinen optischen Systems, mit welchem beliebige Lichtverteilungen erzeugt werden können. Bei Fahrzeugscheinwerfern wird die Größe des Scheinwerfers durch die erforderliche Größe der Lichtaustrittsfläche bestimmt. Sie muss so groß gewählt werden, dass der Scheinwerfer keine unzulässige Blendung des Gegenverkehr oder von Passanten verursacht. Außerdem sollte der Winkelbereich, in den die optimale Lichtquelle emittiert, begrenzt sein, so dass möglichst alles abgestrahlte Licht durch das optische System umgelenkt werden kann. Die Größe, in welcher beide Forderungen quantifizierbar vereint werden, ist die Étendue (siehe Abschnitt 2.2.3).

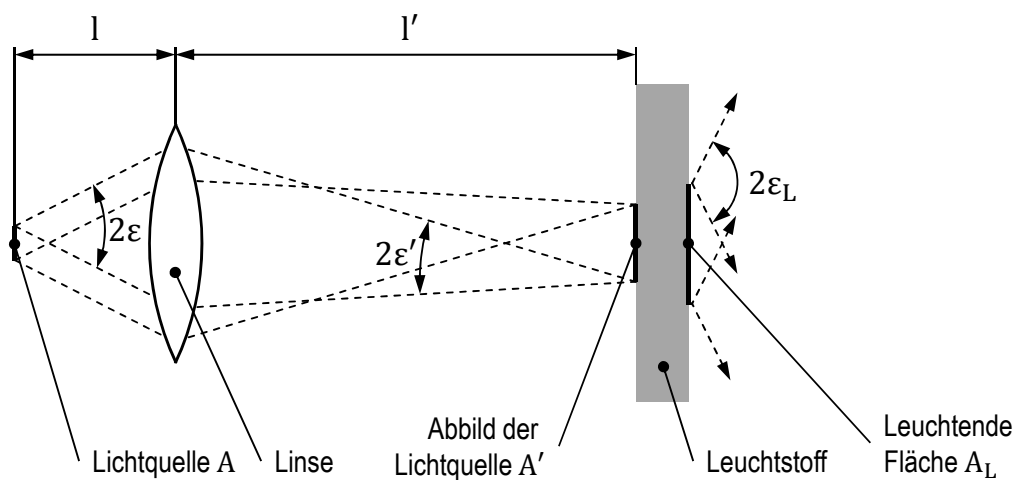


Abbildung 4.11: Étendue eines optisch angeregten Leuchtstoffs [WOLF16a]

Eine Laserdiode als Lichtquelle kommt der idealen Lichtquelle mit einer Étendue von Null nahe. Die hier genutzte Diode weist Abstrahlwinkel von 7° parallel zur aktiven Schicht und von ungefähr 23° senkrecht dazu auf [OSRA13a]. Die lichtabstrahlende Fläche des Kantenemitters ist wenige Quadratmikrometer groß. Für die Étendue des von der Laserlichtquelle abgestrahlten Lichts gilt Gleichung 2.14:

$$\mathcal{E} = \pi A \sin^2 \varepsilon. \quad (4.1)$$

Ist die in Abbildung 4.11 dargestellte Linse ideal, so ist die Étendue \mathcal{E}' des auf dem Leuchtstoff fokussierten Laserlichts gleich der abgestrahlten Étendue \mathcal{E} . Für reale optische Elemente gilt

$$\mathcal{E}' = \pi A' \sin^2 \varepsilon' > \mathcal{E}. \quad (4.2)$$

Die lichtabstrahlende Fläche A_L des Leuchtstoffs ist durch Lichtausbreitung im Material immer größer als die angeregte Fläche A' (vergleiche Abbildung 4.6). Da der Leuchtstoff unter Vernachlässigung der Reflexion an der Oberfläche wie ein Lambertstrahler abstrahlt, gilt

$\varepsilon_L = 120^\circ$. Der Öffnungswinkel ε' des anregenden Lichtbündels ist im Allgemeinen deutlich kleiner. Daraus folgt, dass die Étendue \mathcal{E}_L des abgestrahlten weißen Lichts deutlich größer ist als die Étendue \mathcal{E}' des anregenden Laserlichts. Dem gegenüber steht gemäß der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges die deutliche Erhöhung des Lichtstroms bei der Konversion des blauen Laserlichts in weißes Licht. Diese Änderung wird in der Größe Étendue nicht berücksichtigt, da sie lediglich auf geometrischen Parametern basiert.

Um die Étendue des weißen Lichts möglichst niedrig zu halten, muss die leuchtende Fläche A_L klein sein. Dies geschieht zum einen durch Wahl eines geeigneten Leuchtstoffs, der die angeregte Fläche A' nicht deutlich vergrößert. Zum anderen wird A' und somit auch A_L kleiner, wenn der Öffnungswinkel ε' des anregenden Lichts vergrößert wird.

Für die dargestellte Abbildung eines Gegenstandes durch eine Linse gilt der zweite Strahlensatz:

$$\frac{l}{\sqrt{A}} = \frac{l'}{\sqrt{A'}} \quad (4.3)$$

Die Größe des Gegenstands $\sqrt{A'}$ ist dabei proportional zu der Wurzel der Emissionsfläche der Lichtquelle (\sqrt{A}).

Ein kleines Abbild A' der Lichtquelle auf dem Leuchtstoff erfordert somit einen großen Abstand zwischen Lichtquelle und Linse und einen kleinen zwischen Linse und Leuchtstoff. Durch den Abstrahlwinkel der Laserlichtquelle von 7° in der einen und 23° in der anderen Richtung muss auch die Linse entsprechend groß sein. Für transmissiv eingesetzte Leuchtstoffe ist der beschriebene Aufbau mit großer Linse und kleinem Abstand zwischen Linse und Leuchtstoff möglich, da die Linse der Lichtemission des Konverters nicht im Wege ist. Soll der Leuchtstoff jedoch reflektiv eingesetzt werden, beispielsweise um dem Thermal Quenching entgegenzuwirken, so kann der Öffnungswinkel ε' des anregenden Lichts nicht beliebig vergrößert werden. Anderenfalls lenkt die Linse, welche das Laserlicht auf den Leuchtstoff fokussiert, einen Großteil des emittierten weißen Lichts auf die Diode, wo es nicht genutzt werden kann. Für reflektiv eingesetzte Leuchtstoffe kann die bestrahlte Fläche A' somit nur begrenzt verkleinert werden.

Außerdem muss berücksichtigt werden, dass ein großer Winkel ε' vermehrt Licht unter flachen Winkeln auf den Leuchtstoff treffen lässt, so dass der Anteil des senkrecht polarisierten Lichts, der durch Fresnelreflexion an der Oberfläche verloren geht, zunimmt.

4.4.2 Wirkungsgrad des Systems

Der Gesamtwirkungsgrad eines optischen Systems, das auf einer leuchtstoffkonvertierten Laserdiode basiert, ergibt sich als Produkt des Wirkungsgrads vieler Teilsysteme:

Diodentreiber

Laserdioden werden, wie auch LEDs, typischerweise mit einem Konstantstromtreiber

betrieben, der die elektrische Leistung aufnimmt. PWM-Betrieb ist ebenfalls möglich. Der Wirkungsgrad dieser Treiber liegt bei 80 % ... 95 %.

Laserdiode

Der Wirkungsgrad einer Laserdiode wird durch das Verhältnis von abgegebener optischer Strahlungsleistung und aufgenommener elektrischer Leistung als WPE (wall plug efficiency) angegeben. Die WPE ist abhängig von dem internen Quantenwirkungsgrad des Halbleiterchips und dessen Auskoppelleffizienz [SCHU06]. Die WPE aktueller blauer Hochleistungs-Laserdioden liegt bei etwa 25 % [BASU13].

Fokussierungsoptik

Die Emission der Laserdiode muss auf den Leuchtstoff fokussiert werden. Hierfür lassen sich antireflexbeschichtete Linsen verwenden, welche über einen hohen Wirkungsgrad verfügen. Dennoch kommt es zu Verlusten, da Laserdioden typischerweise in einer Richtung einen großen Öffnungswinkel der Emission aufweisen. Dadurch kann nicht alles emittierte Licht von der Apertur der Linse erfasst werden. Der Wirkungsgrad der in dieser Arbeit genutzten Kollimationslinsen beträgt im Zusammenspiel mit den betrachteten Laserdioden etwa 93 %, vergleiche Abbildung 6.32.

Leuchtstoff

Der Wirkungsgrad des Leuchtstoffs ist von der notwendigen Wellenlängenänderung des Lichts abhängig. Dieser setzt sich aus Verlusten durch Reflexion an der Oberfläche in Höhe von etwa 10 % und Verlusten durch Stokes Shift zusammen. Weitere Verluste durch Absorption des konvertierten Lichts sind typischerweise gering, allerdings hat die Auskoppelleffizienz, wie auch bei Laserdioden, einen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Leuchtstoffs. Für den Wirkungsgrad der Konversion von blauem zu gelbem Licht gilt

$$\eta_{Stokes} = \frac{E_{gelb}}{E_{blau}}. \quad (4.4)$$

Mit

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (4.5)$$

gilt

$$\eta_{Stokes} = \frac{\frac{h \cdot c}{\lambda_{gelb}}}{\frac{h \cdot c}{\lambda_{blau}}} = \frac{\lambda_{blau}}{\lambda_{gelb}}. \quad (4.6)$$

Mit einer dominanten Wellenlänge der Anregungsstrahlung von $\lambda_{blau} = 450 \text{ nm}$ sowie des emittierten Lichts von $\lambda_{gelb} = 580 \text{ nm}$ ergibt sich ein Wirkungsgrad des Stokes Shifts von $\eta_{Stokes} = 0,776$. Da weißes Licht als Mischung von konvertiertem gelbem und unkonvertiertem blauem Licht im Verhältnis von ungefähr 3 : 2 entsteht und das blaue Licht keinen Verlust durch Stokes Shift erfährt, lässt sich der Gesamtwirkungsgrad durch Stokes Shift zu

$$\eta_{Stokes, ges} = \frac{3}{5} \cdot 0,776 + \frac{2}{5} \cdot 1 = 0,866 \quad (4.7)$$

Tabelle 4.4: Maximale Lichtausbeute theoretischer weißer Lichtquellen nach [HUNG13]

Farbwiedergabe- index R_a	Lichtausbeute LER im lm/W				
	3500 K	4500 K	5500 K	6500 K	7500 K
beliebig	493	461	435	414	398
0	478	452	429	411	397
30	459	434	412	395	381
50	444	420	399	383	370
70	428	405	385	370	357
80	416	395	376	361	349
90	401	381	363	349	338
95	387	367	349	335	324
97	377	357	339	326	315
99	359	344	328	315	305
100	179	195	196	194	189

bestimmen. Durch die oben beschriebenen Faktoren wie Reflexion an der Oberfläche des Leuchtstoffs, Absorptions- und Auskopplungsverlusten wird dieser Wirkungsgrad weiter reduziert. Ohne Thermal Quenching ist ein Wirkungsgrad bei der Konversion von blauem zu weißem Licht von etwa 75 % zu erwarten.

Optisches System

Der Wirkungsgrad eines strahlformenden optischen Systems ist stark abhängig von der spektralen Zusammensetzung des einfallenden Lichts. Eine qualitativ hochwertige Aluminiumbeschichtung beispielsweise weist bei 550 nm eine Reflektivität von 91,5 % auf [NAUM92]. Fresnel-Verluste, die an allen unbeschichteten transmissiven Elementen auftreten, bewegen sich je nach Material und Wellenlänge in der Größenordnung von 4 % pro Übergang Luft-Medium oder umgekehrt. Für Ein- oder Ausfallwinkel des Lichts deutlich unterhalb von 90° steigen die Fresnel-Verluste an. Der Transmissionsgrad einer Glasscheibe bei senkrechter Beleuchtung beträgt somit $\eta_S = 0,96^2 \approx 0,92$. Durch den Einsatz entsprechender optischer Beschichtungen kann der Wirkungsgrad deutlich erhöht werden. Wichtig ist zu beachten, dass der Wirkungsgrad des optischen Systems wellenlängenabhängig ist und sich deswegen die Lichtfarbe und spektrale Zusammensetzung vor und nach dem optischen System voneinander unterscheiden.

Außerdem muss beachtet werden, dass in nahezu allen Fällen das optische System nicht den gesamten von der Lichtquelle abgestrahlten Lichtstrom erfasst und umlenkt. In Abschnitt 5.3 wird dieser Umlenk-Wirkungsgrad am Beispiel eines Paraboloid-Reflektors näher betrachtet.

Beobachter

Die wahrgenommene Lichtintensität hängt von einer Vielzahl physiologischer Größen ab, die noch nicht alle vollkommen verstanden sind. Vor allem in dem für die Fahrzeug-

beleuchtung relevanten Bereich des mesopischen Sehens fehlen handhabbare Modelle. Ungeachtet davon wird auch für Fahrzeuglichtquellen Bezug auf die CIE 1931 für photopisches Sehen zur Ermittlung der lichttechnischen Größen genommen.

Die Lichtausbeute ist stark von der spektralen Zusammensetzung des Lichts abhängig. Hung und Tsao haben eine beachtenswerte theoretische Analyse der maximalen Lichtausbeute LER weißer Lichtquellen veröffentlicht, welche in Tabelle 4.4 zusammengefasst ist [HUNG13]. In Abhängigkeit von Farbtemperatur und Farbwiedergabeindex geben sie die maximal erreichbare Lichtausbeute für Lichtquellen an, die ein beliebiges Wellenlängenspektrum emittieren können. Diese mathematisch modellierten Lichtquellen lassen sich in der Praxis kaum realisieren. Dafür ermöglichen sie einen hervorragenden Vergleich einer realen Lichtquelle mit der optimalen Weißlichtquelle in Bezug auf die Lichtausbeute.

Für alle Lichtquellen mit einer Farbtemperatur $> 3500\text{ K}$ gilt, dass die Lichtausbeute mit steigender Farbtemperatur abnimmt. Je größer der geforderte Farbwiedergabeindex R_a ist, desto geringer ist die maximale Lichtausbeute, wobei der Rückgang besonders für $R_a \geq 97$ signifikant ist. Die höchste Lichtausbeute kann somit mit einer Lichtquelle erreicht werden, die eine geringe Farbtemperatur und einen geringen Farbwiedergabeindex aufweist. Eine Ausnahme hiervon stellen Lichtquellen mit $R_a = 100$ dar, deren Lichtausbeute durch die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Spektrums vergleichsweise gering ist. Ihre höchste Wirksamkeit liegt bei einer Farbtemperatur von 5000 K bis 5500 K .

Für reale, mit blauem Licht angeregte Leuchtstoffe sind Lichtausbeuten von 340 lm/W realistisch.

Tabelle 4.5: Abschätzung der Lichtausbeute eines Scheinwerfers basierend auf Laserdioden und Leuchtstoffen

Komponente	Wirkungsgrad bzw. LER
Diodentreiber	90 %
Laserdiode	25 %
Fokussierungsoptik	93 %
Leuchtstoff	75 %
Optisches System	80 %
Beobachter ($V(\lambda)$)	340 lm/W
Gesamtsystem	43 lm/W

Mit diesen Werten wird die Lichtausbeute des Gesamtsystems eines auf Laserdioden und Leuchtstoffen basierenden Scheinwerfers abgeschätzt (Tabelle 4.5). Das Ergebnis von 43 lm/W berücksichtigt alle Komponenten des Scheinwerfers von dem Diodentreiber bis hin zur Abschlusscheibe. Für die alleinige Lichtquelle, bestehend aus Laserdiode, Fokussierungsoptik und Leuchtstoff, ergibt sich unter Berücksichtigung der $V(\lambda)$ -Kurve eine Lichtausbeute von 59 lm/W . Die Lichtausbeute weißer Hochleistungs-LEDs beträgt etwa 140 lm/W , was deut-

lich über dem Wert der weißen Laserlichtquelle liegt, deren limitierender Faktor vor allem die Effizienz der Laserdiode ist.

Als Folge davon ist der Einsatz einer weißen Laserlichtquelle nur dort sinnvoll, wo eine Lichtquelle mit kleiner Étendue benötigt wird. In diesen Fällen mit deutlich limitiertem Bauraum aber hohen Anforderungen an die erzeugte Lichtverteilung kommt der Vorteil einer Laserlichtquelle zum Tragen. Wird der Wirkungsgrad des Systems darüber hinaus nicht als Lichtstrom pro elektrischer Leistung definiert, sondern auf die beabsichtigte Lichtwirkung bezogen, beispielsweise auf das Erzeugen einer hohen Lichtstärke, so schneidet das Lasersystem deutlich besser ab.

5 Optische Konzepte für Laserscheinwerfermodule

In diesem Kapitel werden basierend auf den Anforderungen aus Abschnitt 5.1 insgesamt drei Muster von Laserscheinwerfern aufgebaut. Dazu werden zunächst verschiedene Konzepte für den Aufbau des Systems erstellt und bewertet. Da das primäre Ziel des Zusatzfernlichts die Erzeugung einer hohen Lichtstärke ist, kommt gemäß Abschnitt 3.3.1 ein auf einem Paraboloid basierender Reflektor zum Einsatz. Der Wirkungsgrad dieses Reflektortyps wird in Abschnitt 5.3 für verschiedene mögliche Konfigurationen bestimmt. Die Lichtquelle wird dabei als Lambertstrahler modelliert, was in guter Näherung die Abstrahlcharakteristik einer angeregten Leuchtstofffläche wiedergibt. Auf Grundlage dieser Betrachtung werden zwei Ansätze mit gutem Wirkungsgrad ausgewählt und in drei Mustern von laserbasierten Zusatzfernlichtmodulen realisiert. Für jedes System werden die Stärken und die Verbesserungsmöglichkeiten herausgestellt, die in die Ausarbeitung des jeweils nächsten Musters einfließen.

5.1 Anforderungen

Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten befassen sich mit der Frage nach einer guten Lichtverteilung für Zusatzfernlichter. Die Forschergruppe um Rosenhahn hat erste Probandenstudien mit einem Lichtsystem durchgeführt, dessen Beleuchtungsstärke im Hot Spot mit der eines guten Laserscheinwerfers vergleichbar ist [ALBR15]. Das von Albrecht et al. eingesetzte *Laserperforming System* basiert jedoch nicht auf Laserlichtquellen, sondern überlagert die Lichtverteilungen mehrerer konventioneller Fernlichtmodule. Die vorgestellte Testumgebung liefert folglich einen stark erhöhten Lichtstrom und beleuchtet weite Bereiche des Verkehrsraums mit hoher Lichtstärke. Diese sehr breite und auch in vertikaler Richtung signifikant ausgehende Lichtverteilung ist eher ungeeignet, da sie in spezifischen Verkehrssituationen zu einer vermehrten Blendung der Probanden geführt hat. Erste Vorschläge für Lichtverteilungen von laserbasierten Zusatzfernlichtmodulen liefern Leroux et al. [LERO14]. Zum Thema Blendung sei angemerkt, dass einer von Helmer und Neumann durchgeführten Studie zur Folge laserbasierte Systeme nicht schlechter abschneiden als LED-Systeme, wobei sie allerdings die Wirkung blendfreier Scheinwerfermodule untersucht haben [HELM16].

Kishimoto und Kawanishi stellen in ihrer Offenlegungsschrift den Vorteil eines laserbasierten Scheinwerfers hinsichtlich kompakten geometrischen Abmessungen heraus [KISH11b]. Sie beschreiben einen Scheinwerfer, dessen Lichtquelle eine Leuchtdichte von mehr als 25 cd/mm^2

aufweist. Ein vergleichsweise kompaktes Umlenkelement, beispielsweise ein Reflektor, mit einer Größe von weniger als 2000 mm^2 senkrecht zur optischen Achse dient der Formung der Lichtverteilung. Ihren Ausführungen zur Folge genügt der Einsatz eines optischen Systems mit der spezifizierten Fläche der Erzeugung einer Lichtstärke von 100.000 cd , wenn eine Lichtquelle mit einer Leuchtdichte von mindestens 72 cd/mm^2 eingesetzt wird. Dabei gehen sie von einem Wirkungsgrad des Umlensystems von 70% aus.

Das Laserzusatzfernlicht, welches im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wird, soll einen Hot Spot mit einer Beleuchtungsstärke von mindestens $E_{HV} = 100 \text{ lx}$ erzeugen. Dieser Wert liegt im Bereich konventioneller Halogen-Zusatzfernlichter und wird als untere Grenze für ein gutes Zusatzfernlicht betrachtet. Der horizontale Öffnungswinkel ε_H der erzeugten Lichtverteilung soll mindestens $\pm 6^\circ$ betragen (vergleiche Abbildung 5.1). In diesem Bereich ist die Lichtstärke des Hauptscheinwerfers, in dem das Modul zum Einsatz kommen soll, vergleichsweise gering. Als Grenzwert wird ein Zehntel der Beleuchtungsstärke im Hot Spot herangezogen. Allerdings wird der auszuleuchtende Winkelbereich mit der Weiterentwicklung des Scheinwerfermoduls im Rahmen dieser Arbeit angepasst. Der vertikale Öffnungswinkel ε_V der Lichtverteilung soll möglichst gering sein, um den von Laserdioden und Leuchtstoff erzeugten Lichtstrom fokussiert zu halten und somit den Vorteil der laserbasierten Scheinwerfer in der Erzeugung präziser Lichtverteilungen deutlich herausstellen zu können. Die Farbtemperatur des Systems soll im Bereich von 5000 K bis 6000 K liegen, wobei die Erfüllung dieser Wunschforderung vor allem von den verfügbaren Leuchtstoffen abhängt.

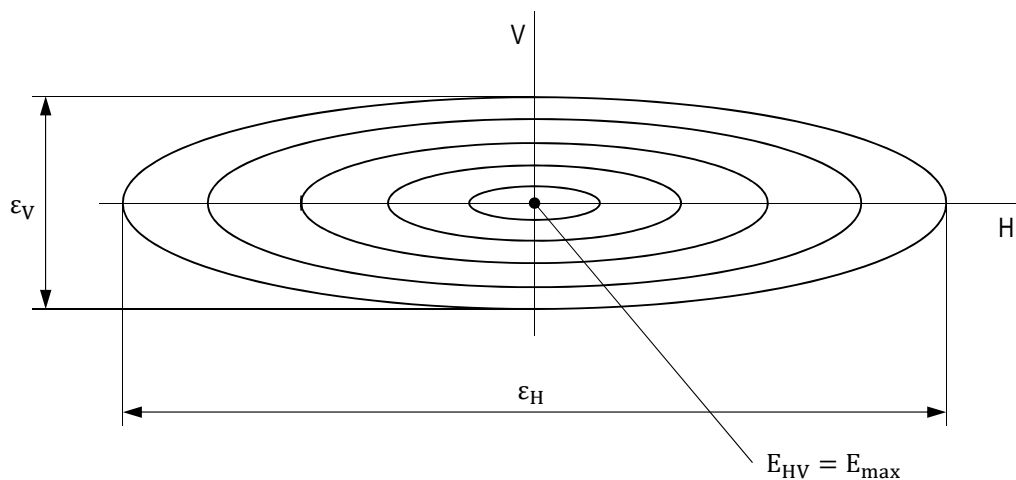


Abbildung 5.1: Angestrebte Lichtverteilung des Laserscheinwerfers

Aus stilistischen Gründen sowie zur Erzeugung eines signifikanten Lichtstroms sollen vier Laserdioden zum Einsatz kommen, welche jeweils über eine optische Nennleistung von mindestens $1,4 \text{ W}$ verfügen. Die dominante Wellenlänge der Laserdioden soll mit $440 \text{ nm} < \lambda < 460 \text{ nm}$ im blauen Spektralbereich liegen, da für diesen Wellenlängenbereich geeignete Konvertermaterialien verfügbar sind. Alle Dioden sind baugleich, um die elektrische Ansteuerung einfach gestalten zu können. Um möglichst viel des erzeugten Lichtstroms für die beabsichtigte Lichtverteilung einsetzen zu können, wird ein Umlenkwirkungsgrad von mindestens 90% angestrebt. Der Begriff Umlenkwirkungsgrad bezeichnet dabei den Teil des Lichtstroms, welcher von einem optischen System wie Reflektor oder Linse in die beabsichtigte Richtung umgelenkt wird. Der


 Leibniz Universität Hannover		Laser-Zusatzfernlicht		F = Festforderung Z = Zielforderung W = Wunschforderung Seite 1/1	
Nr.	Anforderungen	Art	Wert/ Bereich		Einheit
			Exakt	Toleranz	
1	Lichttechnische Anforderungen				
1.1	Max. Beleuchtungsstärke in HV	F	100	min.	lx
1.2	Horizontaler Öffnungswinkel $\varepsilon_H @ 10\% E_{HV}$	Z	-6 ... +6	min.	°
1.3	Vertikaler Öffnungswinkel $\varepsilon_V @ 10\% E_{HV}$	Z	-2 ... +2	max.	°
1.4	Lichtstrom des Systems	Z	200	min.	lm
1.5	Farbtemperatur	W	5500	+/- 500	K
1.6	Opt. Leistung pro Laserdiode	F	1,4	min.	W
1.7	Anzahl Laserdioden	F	4	-	-
1.8	Dominante Wellenlänge Laserdiode	F	450	+/- 10	nm
1.9	Frequenzkonversion	F	Leuchtstoff	-	-
1.10	Umlenkwirkungsgrad	Z	90	min.	%
2	Thermische Anforderungen				
2.1	Betriebstemperatur	W	-40 ... +80	-	°C
2.2	Anbindung an Fahrzeugkühlsystem	F	keine	-	-
3	Geometrische Anforderungen				
3.1	Einbauort und Bauraum	F	Position des Zusatzfernlichts	-	-
3.2	Kopplung an automatische Winkeleinstellung des SW	F	ja	-	-
3.3	Justage relativ zu SW vertikal	F	+/- 1	min.	°
3.4	Justage relativ zu SW horizontal	W	+/- 1	min.	°
4	Elektrische Anforderungen				
4.1	Energieversorgung	F	ext. Netzteil	-	-
4.2	Regelung der Dioden	F	konstanter Strom	-	-
4.3	PWM-Betrieb der Dioden	F	nein	-	-
5	Sicherheit				
5.1	Austritt kollimierter Laserleistung im Schadensfall verhindern	F	passiv	-	-
6	Fertigung und Material				
6.1	Fertigung	Z	im Hause	-	-
6.2	Material	F	Aluminium, PMMA	-	-
6.3	Beschichtung	Z	keine	-	-

Abbildung 5.2: Anforderungsliste

Transmissionsgrad der Linse beziehungsweise der Reflexionsgrad des Reflektors werden dabei vernachlässigt.

Das Lasermodul soll im gesamten Temperaturbereich von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ einsetzbar sein, der üblicherweise für Fahrzeugscheinwerfer angenommen wird. Gegebenenfalls muss die Leistung der Laserdioden mit steigender Umgebungstemperatur reduziert werden, um einen thermisch stabilen Betrieb unterhalb der maximal zulässigen Junctiontemperatur zu ermöglichen. Das Kühlsystem des Moduls muss als eigenständiges System ausgelegt werden, eine Anbindung an den Kühlkreislauf des Fahrzeugs würde die Systemkomplexität zu weit erhöhen und wird von der Fahrzeugbranche gemeinhin nicht akzeptiert.

Der zur Verfügung stehende Bauraum wird vom Scheinwerfer vorgegeben, in welchen das Modul exemplarisch integriert werden soll. Hierbei handelt es sich zunächst um den Xenonscheinwerfer des *Porsche Boxster* Typ 981, im weiteren Verlauf der Arbeit um den Scheinwerfer eines *Porsche 911*, Typ 991. Das Laserfernlichtmodul soll gemeinsam mit dem Hauptscheinwerfer nivelliert werden können, wie es für das konventionelle Zusatzfernlicht vorgesehen ist. Zusätzlich muss eine Justagemöglichkeit in vertikaler Richtung vorgesehen werden, die eine Verstellung um mindestens $\pm 1^{\circ}$ ermöglicht. Eine entsprechende Einstellmöglichkeit in horizontaler Richtung ist wünschenswert, jedoch nicht zwingend erforderlich.

Für den prototypischen Aufbau des Systems ist eine externe Energieversorgung ausreichend. Dabei werden die vier Dioden in Reihe geschaltet und mit konstantem Strom betrieben, um die optische Ausgangsleistung zu steuern. Eine PWM-Regelung kann den Wirkungsgrad des Systems unter bestimmten Umständen noch steigern (vergleiche Abschnitt 6.1.1).

Der Laserscheinwerfer muss mit passiven und zusätzlichen aktiven Sicherheitskonzepten versehen werden, um das Austreten von kollimierter Laserstrahlung im Schadensfall zu verhindern. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich passive Konzepte in das Modul integriert. Eine Integration aktiver Sicherheitskonzepte in die Ansteuerung des Lasermoduls wird in Abschnitt 5.2.4 theoretisch betrachtet.

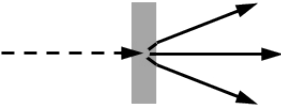
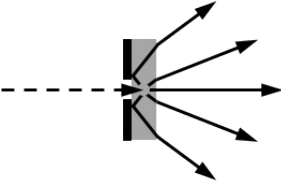
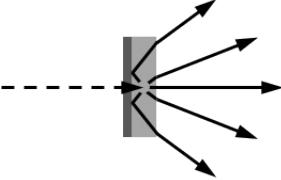
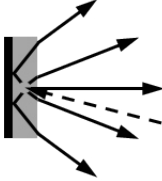
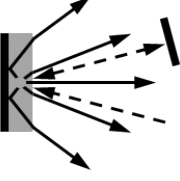
Die Fertigung des Moduls soll, so weit möglich, in der Werkstatt des Instituts für Produktentwicklung und Gerätebau erfolgen. Deswegen stehen als optische Materialien Aluminium und PMMA zur Verfügung. Auf den Einsatz von Beschichtungen wird, so weit möglich, verzichtet. Stattdessen werden Reflektoren aus Aluminium-Vollmaterial gefräst. Der Einsatz einer korrosionshemmenden Beschichtung des Aluminiums ist sinnvoll, jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Optische Antireflexbeschichtungen von Linsen hingegen werden aus Kostengründen von der Automobilindustrie möglichst vermieden und im Rahmen der Konzeptionierung des Systems auf den folgenden Seiten nicht näher betrachtet. Der Einsatz von dichroitischen Beschichtungen hingegen erschließt neue Lösungsmöglichkeiten und wird deswegen im folgenden Abschnitt 5.2 berücksichtigt.

5.2 Konzepte für Laserscheinwerfer

Der optische Aufbau eines Laserscheinwerfers lässt sich in die drei Teilsysteme *Leuchtstoff*, *Optisches System* und *Lichtlenkung auf den Leuchtstoff* unterteilen. Für jedes dieser Systeme werden verschiedene Lösungen vorgestellt. Anschließend werden sie zu Konzepten von Laserscheinwerfern zusammengefügt und bewertet.

5.2.1 Anregung des Leuchtstoffs

Tabelle 5.1: Konzepte zur Anregung von Leuchtstoffen, Skizze Nr. 5 nach [MUST14]

Nr.	Einsatzart	Skizze	Spiegel
1	transmissiv		kein
2	transmissiv		mit Bohrung
3	transmissiv		dichroitisch
4	reflektiv		Trägermaterial
5	reflektiv		Trägermaterial, zus. Spiegel

In Tabelle 5.1 sind fünf Konzepte zum Anregen des Leuchtstoffs und zur Beeinflussung von dessen Abstrahlcharakteristik dargestellt. In Konzept 1 wird der Leuchtstoff transmissiv eingesetzt. Dabei befinden sich Anregung und beabsichtigte Emission auf gegenüberliegenden

Seiten. Ein Teil des konvertierten gelben und gestreuten blauen Lichts wird jedoch an der Anregungsseite emittiert, was für viele optische Systeme ungeeignet ist und somit als Verlust betrachtet werden muss. Zur Verbesserung der thermischen Anbindung kann der Leuchtstoff auf Saphirglas als transmissivem Trägermaterial aufgebracht werden.

Zur Verbesserung des Wirkungsgrads wird in Konzept 2 ein Spiegel mit einer kleinen Bohrung auf der Anregungsseite positioniert, durch welche das Laserlicht auf den Leuchtstoff treffen kann. Der Großteil des nach hinten emittierten blauen und gelben Lichts wird durch den Spiegel umgelenkt, so dass es in die beabsichtigte Emissionsrichtung umgelenkt wird [SCHU14]. Eine gute thermische Anbindung des Spiegels, durch die Wärme vom Leuchtstoff abgeführt werden kann, ist prozesstechnisch durch die vorhandene Bohrung nicht leicht zu realisieren.

Bei Konzept 3 wird statt des Lochspiegels ein *dichroitischer* Spiegel eingesetzt, der Licht in Abhängigkeit der Wellenlänge und des Einfallswinkels entweder reflektiert oder transmittiert. Senkrecht auftreffendes blaues Licht vom Laser wird durchgelassen, während konvertiertes gelbes Licht reflektiert wird. Nach Möglichkeit wird der Spiegel so gewählt, dass auch schräg auftreffendes, gestreutes blaues Licht reflektiert wird (vergleiche [SCHU14]). Eine Wärmeabfuhr kann durch den dichroitischen Spiegel, der über eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit verfügt, nur bedingt erfolgen.

Alternativ kann der Leuchtstoff auf ein reflektives Trägermaterial aufgebracht werden (Konzept 4). Dieses bietet hinsichtlich der thermischen Anbindung Vorteile und stellt sicher, dass der Leuchtstoff nur zu einer Seite emittiert. Nachteilig ist, dass Anregung und Emission auf der gleichen Seite erfolgen müssen, so dass ein Teil der Lichtemission des Leuchtstoffs durch weitere Bauteile wie Laserdiode oder Umlenkspiegel abgeschattet wird.

Das von Muster et al. geschützte Konzept 5 basiert auf Konzept 4. Dabei wird ein zusätzlicher Spiegel genutzt, welcher die an der Oberfläche des glatten Leuchtstoffs gerichtet reflektierte Laserstrahlung erneut auf den Leuchtstoff lenkt und dadurch die Umwandlungseffizienz steigert [MUST14]. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der zusätzliche Spiegel gleichzeitig den Raumwinkel verkleinert, unter welchem das vom Leuchtstoff abgestrahlte Licht genutzt werden kann.

Bei allen fünf Konzepten sollte ein keramischer Leuchtstoff eingesetzt werden, welcher über eine höhere Wärmeleitfähigkeit verfügt als ein pulverbasierter.

5.2.2 Optisches System

In Tabelle 5.2 werden insgesamt neun Konzepte von optischen Systemen aufgelistet, mit welchen eine Scheinwerferlichtverteilung erzeugt werden kann. Ein wichtiges Unterscheidungskriterium ist neben dem Wirkprinzip die Emissionsrichtung des Leuchtstoffs, welcher als Lambertstrahler angenommen wird.

In den Konzepten 1 und 2 wird jeweils eine Linse genutzt, um das von einem Leuchtstoff nach vorne abgestrahlte Licht zu einer Lichtverteilung umzuformen. Statt einer klassischen

Tabelle 5.2: Konzepte für optische Systeme

Nr.	Wirkprinzip	Skizze	Emission Leuchtstoff
1	Brechung		nach vorne
2	Brechung		nach vorne
3	Beugung		nach vorne
4	Reflexion		nach hinten
5	Reflexion		nach vorne
6	Reflexion		zur Seite
7	Reflexion		nach vorne
8	Kombination		nach vorne
9	Kombination		nach hinten

Konvexlinse wird in Konzept 2 eine Fresnel-Linse eingesetzt, welche bei Wahrung der Funktion deutlich dünner gestaltet werden kann. Beachtet werden muss jedoch, dass fertigungstechnisch unvermeidbare Rauten an den Kanten der facettierten Linse zu Streulicht führen, das die Lichtverteilung negativ beeinflusst. Allen Linsensystemen ist gemein, dass sie Licht entsprechend seiner Wellenlänge unterschiedlich stark brechen, so dass Farbsäume in der Lichtverteilung entweder toleriert oder durch eine weitere Linse oder ein Beugungselement korrigiert werden müssen.

In Konzept 3 wird das Lichtbild durch ein diffraktives optisches Element anstatt durch eine Linse erzeugt. Dieses beugt einfallendes Licht durch Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts. Beugungselemente führen ähnlich wie Linsen zu einer Aufspaltung des Lichts in seine spektralen Bestandteile. Für monochromatisches Licht wie beispielsweise bei Heckleuchten sind diffraktive optische Elemente sehr gut geeignet, da hier die Farbfehler nicht in Erscheinung treten und diffraktive optische Elemente in sehr flache Systeme integriert werden können.

Die Konzepte 4 bis 7 basieren auf Reflexion. In Variante 4 wird ein Reflektor von einer nach hinten emittierenden Leuchtstoffschicht bestrahlt, weshalb dieser Ansatz als *Rückprojektion* bezeichnet wird. Zur Erzeugung parallelen Lichts aus einer Punktlichtquelle kommt als Reflektor ein Rotationsparaboloid zum Einsatz.

Im Gegensatz dazu zeigt Konzept 5 einen Reflektor in Kombination mit einem nach vorne emittierenden Leuchtstoff (*Frontprojektion*). Bei diesem Ansatz kann jedoch nicht alles vom Leuchtstoff in den 2π -Halbraum emittierte Licht vom Reflektor erfasst und umgelenkt werden.

Konzept 6 zeigt ein sogenanntes *Off-axis-System*, bei dem die Hauptabstrahlrichtung der Lichtquelle nicht mit der optischen Achse des Systems übereinstimmt. Im dargestellten Fall beträgt der Winkel zwischen beiden Achsen 90° , andere Winkel sind ebenfalls möglich. Wie bei Konzept 5 so ist es auch bei diesem Ansatz nicht möglich, alles vom Leuchtstoff emittierte Licht mit dem Reflektor umzulenken.

In Konzept 7 wird der Reflektor aus Konzept 5 mit einem weiteren, innenliegenden Reflektor kombiniert, um den Wirkungsgrad des Systems zu steigern. Beide Reflektoren befinden sich auf einer gemeinsamen optischen Achse. Durch den zweiten Reflektor wird ein Teil des Lichtstroms, welcher am großen Reflektor vorbeigelangt, umgelenkt. Dabei werden die Reflektoren so angeordnet, dass kein Lichtstrahl von beiden Reflektoren abgelenkt wird.

In Konzept 8 wird statt des innenliegenden Reflektors aus Variante 7 eine Linse eingesetzt, welche alles Licht, das am Reflektor vorbeigelangt, umlenkt. So wird jeder Lichtstrahl entweder nur durch den Reflektor oder alleine durch die Linse in seiner Richtung beeinflusst. Die wellenlängenabhängige Brechkraft der Linse muss bei diesem Ansatz berücksichtigt werden.

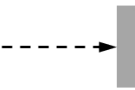
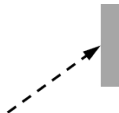
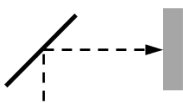



In Konzept 9 wird aus einem Reflektor und einer Linse ein Projektionssystem gebildet. Der Vorteil dieses Systems ist ein sehr hoher Wirkungsgrad, da der Reflektor wie bei Variante 4 alles emittierte Licht umlenkt. Durch die zusätzliche Linse werden alle Lichtstrahlen, die das

System verlassen, von zwei optischen Komponenten beeinflusst, so dass sich die Toleranzen in der Fertigung und Ausrichtung beider Bauteile summieren.

5.2.3 Lichtlenkung auf den Leuchtstoff

Je nachdem, ob ein Leuchtstoff reflektiv oder transmissiv eingesetzt wird und mit welchem optischem Konzept die Lichtverteilung erzeugt wird, ist mehr oder weniger Aufwand nötig, um das anregende Laserlicht auf den Leuchtstoff zu lenken. In Tabelle 5.3 sind sechs Konzepte zur Lichtlenkung dargestellt.

Tabelle 5.3: Konzepte zur Umlenkung des Laserlichts auf den Leuchtstoff, Skizze Nr. 4 nach [BONY14]

Nr.	Lichtumlenkung	Skizze	Leuchtstoff	Position LD
1	keine		R, T	axial
2	keine		R, T	seitlich
3	Spiegel		R, T	seitlich
4	Spiegel		R, T	axial
5	LWL		R, T	beliebig
6	LWL		T	beliebig

Die Konzepte 1 und 2 stellen die einfachsten möglichen Ansätze dar und verzichten auf lichtlenkende Elemente. Dabei ist Konzept 1 nicht für alle optischen Systeme geeignet. In Kombination mit einem System, bei dem der Leuchtstoff nach hinten emittiert, würde die Laserdiode mittig vor oder in dem optischen System montiert werden müssen. Folglich würden die Diode und ihre thermische Anbindung einen Teil der Strahlung absorbieren.

Bei Konzept 2 hingegen bestrahlt die Laserdiode den Leuchtstoff unter einem definierten Winkel. Dadurch kann die Diode so positioniert werden, dass sie sich beispielsweise seitlich am optischen System und somit nicht im Strahlengang des konvertierten Lichts befindet.

In Konzept 3 wird die Laserstrahlung durch einen Spiegel umgelenkt, so dass die Laserdiode seitlich positioniert werden kann. Der Umlenkspiegel kann gleichzeitig zur Justage genutzt werden, um den Punkt, auf dem der Laser den Leuchtstoff trifft, präzise einstellen zu können.

Das von Bony geschützte Konzept 4 basiert auf einem dichroitischen Spiegel, der Laserlichtquelle und Leuchtstoff einhüllt und die Laserstrahlung reflektiert, das konvertierte Licht jedoch transmittiert [BONY14]. Dabei kann der dichroitische Spiegel so gestaltet werden, dass er das vom Laser abgestrahlte Licht auf den Leuchtstoff fokussiert. Hierfür bietet sich ein Ellipsoidspiegel oder, wie in Tabelle 5.3 dargestellt, ein mit einer planen Ebene geschlossenes, entlang der Rotationsachse halbiertes Ellipsoid als Spiegel an. Beachtet werden muss jedoch, dass das System nach Konzept 4 lediglich konvertiertes Licht emittiert. Eine Überlagerung von Laserlicht und konvertiertem Licht zur Erzeugung eines bestimmten Farborts kann mit diesem Konzept, im Gegensatz zu den anderen hier vorgestellten Ansätzen, nicht genutzt werden.

In den Konzepten 5 und 6 werden Lichtwellenleiter (LWL) genutzt, um Laserdiode und Leuchtstoff räumlich trennen zu können. Dadurch können die Bauteile zur Ansteuerung und Temperierung der Laserdioden außerhalb des Scheinwerfers platziert werden. Auch eine von Erdl und Hanafi beschriebene Lösung, bei der die Halbleiterlichtquelle und das optische System des Scheinwerfers in einem gemeinsamen Gehäuse montiert werden, ist möglich [ERDL13b]. Die Laserdiode wird entweder direkt am Faseraufgang montiert oder ihre Emission über ein optisches Element auf den Faseraufgang abgebildet. Durch Nutzen von Faserbündeln lassen sich effektiv mehrere Anregungs-Lichtquellen kombinieren, wie beispielsweise in der Patentschrift von Kishimoto angeregt [KISH11a].

In Konzept 5 wird der Faseraufgang mit einer Linse auf den Leuchtstoff abgebildet. Wird an dieser Stelle ein Leuchtstoff reflektiv eingesetzt, so muss beachtet werden, dass die Linse in gleichem Maße einen Teil der Weißlichtemission des Leuchtstoffs auf das Faserende abbildet. Dieser Teil des Nutzlichts ist somit als Verlust zu betrachten. In Konzept 6 hingegen wird der transmissiv eingesetzte Leuchtstoff direkt auf ein Faserende aufgebracht.

5.2.4 Lasersicherheit

Da zur Realisierung des Scheinwerfermoduls eine oder mehrere Laserdioden der Klasse 4 nach DIN EN 60825 Teil 1 eingesetzt werden, ist ein Sicherheitskonzept zwingend erforderlich. In Tabelle 5.4 werden mögliche Fehlerquellen genannt und deren Folgen abgeschätzt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Fehlers wird in drei Stufen von gering bis hoch eingeteilt. Jedem Fehler wie beispielsweise dem Austreten von Laserstrahlung wird außerdem ein Gefährdungspotential von kein über gering bis hoch zugeordnet. Mögliche Ansätze zum Detektieren der Fehlerquelle beziehungsweise ihrer Auswirkung werden aufgeführt, so dass das Modul im Zweifelsfall abgeschaltet werden kann.

Alle Fehler, die einen Austritt von gebündelter Laserstrahlung aus dem System zur Folge haben können, werden mit einem hohen Gefährdungspotential bewertet. Jedoch ist die Eintrittswahrscheinlichkeit der hierfür in Frage kommenden Fehlerquellen vergleichsweise gering. Ein Bruch

Tabelle 5.4: Mögliche Fehlerquellen bei Laserscheinwerfern

Fehlerquelle → Folge	Eintritts- wahrscheinlichkeit	Gefährdungs- potential	Gegenmaßnahme
Bruch des Leuchtstoffs → Austritt von Laserstrahlung	gering	hoch	passive und aktive Maßnahmen
Dejustage des Strahlenganges → Austritt von Laserstrahlung	gering	hoch	passive und aktive Maßnahmen
Schaden durch Unfall → Austritt von Laserstrahlung	gering	hoch	Kopplung mit Airbagauslösung
Schaden durch Vandalismus → Austritt von Laserstrahlung	gering	hoch	aktive Maßnahmen
Laserdiode fällt aus → Lichtstrom sinkt	mittel	gering	Messung des Lichtstroms
System wird zu heiß → Schaden an Diode	mittel	gering	Temperatursensor
System wird zu heiß → Veränderung des Farborts	hoch	kein	Temperatursensor

des Leuchtstoffs kann durch aktive oder passive Sicherheitsmaßnahmen abgefangen werden. Geeignete Konzepte hierfür werden auf den folgenden Seiten erarbeitet. Auch der Dejustage des Strahlenganges, beispielsweise hervorgerufen durch zu starke mechanische Erschütterung, kann mit passiven Konzepten wie Strahlfallen oder aktiven Ansätzen wie dem Detektieren des vom Modul abgegebenen Lichtstroms begegnet werden. Ein Unfall des Fahrzeugs, der einen Schaden am Scheinwerfermodul zur Folge haben kann, lässt sich leicht durch eine Kopplung mit der Airbagauslösung detektieren. Wird das Modul hingegen durch andere äußere Einflüsse wie beispielsweise Vandalismus beschädigt, können nur aktive Schutzmaßnahmen wie das Vermessen des angestrahlten Farborts den Austritt von Laserstrahlung effektiv verhindern.

Der Ausfall einer Laserdiode, der durch die begrenzte Lebensdauer dieses Bauteils möglich ist, ist unkritisch und stellt außer der plötzlichen Abnahme der erzeugten Sichtweite keine Gefährdung dar. Durch das Überwachen des vom Modul abgestrahlten Lichtstroms oder der Leistungsaufnahme des Systems lässt sich dieser Fehler detektieren.

Wenn das System zu heiß wird, kann es zum Versagen von einer oder mehreren Laserdioden kommen. Die Folge ist ebenfalls eine Abnahme des Lichtstroms. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Maßnahmen bietet sich für diesen Fehlerfall ein Temperatursensor an, so dass das Modul bei zu hohen Temperaturen abgeschaltet und der Schadenseintritt verhindert werden kann. Eine weitere Folge einer zu hohen Temperatur kann die Veränderung des abgestrahlten Farborts sein. Bei den eingesetzten System kann sich der Farbort nur zwischen blau, weiß und gelb bewegen, was im Straßenverkehr gegebenenfalls störend und nicht mehr zulassungskonform ist, jedoch keine unmittelbare Gefährdung für den Fahrzeugnutzer oder andere Verkehrs-

teilnehmer zur Folge hat. Mit einem Temperatursensor kann die Ursache dieses Fehlers, mit einem Farbortssensor dessen Auswirkung festgestellt werden.

In Tabelle 5.5 sind verschiedene aktive und passive Sicherheitskonzepte dargestellt, mit denen sich ein Austritt von Laserstrahlung im Schadensfall des Konverters verhindern lässt. Bei jedem der in diesem Kapitel erwähnten Scheinwerfersysteme muss der Laserstrahl durch eine entsprechende Optik auf den Leuchtstoff oder in dessen Nähe fokussiert werden. In Konzept 1 verlässt der Laserstrahl im Schadensfall das optische System durch eine Öffnung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Laserstrahl dann an einer entsprechenden Stelle im Modul absorbiert werden muss. Wird ein reflektiver Leuchtstoff eingesetzt, so bleibt auch im Schadensfall des Leuchtstoffs das reflektierende Trägermaterial erhalten. Dadurch wird der Laserstrahl, wenn er senkrecht auf den Leuchtstoff trifft, auf dem selben Wege zurückgeworfen, so dass er das optische System durch die Eintrittsöffnung verlässt. Werden mehrere Laserdioden eingesetzt, so kann das System symmetrisch gestaltet werden. Im Schadensfall verlässt die Laserstrahlung das optische System durch die gegenüberliegende Eintrittsöffnung und gelangt auf die dort befindliche Laserdiode, wo sie absorbiert wird.

In Konzept 2 wird der Laserstrahl, wenn der Leuchtstoff Schaden nimmt, durch einen unmittelbar im Modul platzierten Absorber in Wärme umgewandelt.

In Konzept 3 wird der Laserstrahl so fokussiert, dass der Öffnungswinkel, mit dem die Strahlung auf den Leuchtstoff trifft, groß ist. Im Schadensfall des Konverters breitet sich das Laserlicht vom Brennpunkt aus mit diesem Öffnungswinkel als divergenter Strahl aus. So wird vermieden, dass ein stark gebündelter Laserstrahl im Fehlerfall das Modul verlässt. Je nach Zusammenspiel zwischen Laserdiode und Leuchtstoff kann es sinnvoll sein, den Laserstrahl nicht vollkommen fokussiert auf den Leuchtstoff zu richten. Dabei empfiehlt es sich, den Fokuspunkt des Lasers, wie in der Skizze dargestellt, vor dem Leuchtstoff zu positionieren. Dadurch wird eine hohe Divergenz des Laserstrahls im Schadensfall ermöglicht.

In Konzept 4 wird statt des Absorbers aus Konzept 2 eine Streustruktur in den Reflektor integriert, die auftreffende Laserstrahlung breit auffächert. Bei reflektiv eingesetzten Leuchtstoffen kann das Trägermaterial aufgeraut werden, so dass es im Fehlerfall als Streuelement wirkt. Gut und Berlitz schlagen bei diesem Ansatz vor, entweder einen Teil des Reflektors als Streuelement zu strukturieren oder ein zusätzliches Streuelement hinter dem Leuchtstoff einzusetzen [GUT14a].

In Konzept 5 wird ein Diffusor, ein streuendes, transmissives Element, unmittelbar vor oder hinter dem Leuchtstoff positioniert. Dadurch wird das nicht konvertierte Laserlicht im Fehlerfall aufgefächert. Wird der Diffusor mit Abstand zu dem Konverterelement auf der Emissionsseite platziert, so verändert er dessen Abstrahlcharakteristik negativ, so dass sich das System weiter vom Ideal der Punktlichtquelle entfernt.

Die Konzepte 6 und 7 basieren auf Sensoren, die einen Fehlerfall detektieren. In Konzept 6 wird der Sensor an einer Stelle platziert, die im Fehlerfall von direkter Laserstrahlung getroffen wird. Wird ein bestimmtes Strahlungsniveau überschritten, so wird das Modul abgeschaltet

Tabelle 5.5: Katalog: Lasersicherheitskonzepte

Nr.	Kategorie	Wirkprinzip	Skizze
1	passiv	Absorption	
2	passiv	Absorption	
3	passiv	Streuung	
4	passiv	Streuung	
5	passiv	Streuung	
6	aktiv	Abschaltung	
7	aktiv	Abschaltung	

und der Fehlerfall an die Bordelektronik des Fahrzeugs gemeldet. Idealerweise wird der Sensor so beschichtet, dass er nur für die Laserwellenlänge empfindlich ist. Auf diese Weise kann das Versagen des Leuchtstoffs deutlich von anderen Zuständen mit hoher Bestrahlungsstärke, beispielsweise hervorgerufen durch Sonneneinstrahlung oder die Scheinwerfer des Gegenverkehrs, unterschieden werden.

In Konzept 7 werden ein oder mehrere Sensoren so positioniert, dass sie die Emission des Moduls überwachen. Dieses kann entweder erfolgen, indem die Sensoren die Abstrahlung des Leuchtstoffs detektieren oder einen Teil des vom optischen System umgelenkten Lichts erfassen. Sinnvoll ist ein Vergleich zwischen erfasster Strahlung mit Anregungswellenlänge und konvertierter Lichtmenge. Im Schadensfall emittiert der Leuchtstoff kein oder sehr wenig umgewandeltes Licht, wohingegen der Anteil an erfasstem Laserlicht von der Position des Sensors abhängt. Sehr zu empfehlen ist die Kombination eines Sensors mit einem Streuelement. Im Fehlerfall wird das Laserlicht aufgefächert und vom Sensor erfasst, so dass das Modul abgeschaltet und der Fehler entsprechend an die Fahrzeugelektronik weitergeleitet wird.

Nach Knittel et al. ist auch die Messung der Kohärenzlänge des abgestrahlten Lichts beziehungsweise die Erfassung von Speckles möglich. Im Schadensfall des Konverters wird stark kohärentes Licht mit einem ausgeprägten Specklemuster abgestrahlt. Für Anwendung dieses Ansatzes im Scheinwerfer existiert jedoch nach Knittel et al. kein praktikables Messverfahren zur Bestimmung der Kohärenzlänge des Lichts [KNIT16].

Die hier vorgestellten Ansätze zur Erhöhung der Sicherheit auf Modulebene müssen mit einem oder mehreren der folgenden Sicherheitskonzepte auf der Fahrzeugebene kombiniert werden:

- Das Laserzusatzfernlicht, das zur Erhöhung der Sichtweite bei schnellen Geradeausfahrten gedacht ist, wird erst ab einer bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit, beispielsweise bei 60 km/h , aktiviert. So wird verhindert, dass vor dem Fahrzeug befindliche Passanten im Schadensfall des Systems dem Risiko austretender Laserstrahlung ausgesetzt sind. Weber et al. schlagen insbesondere die Verwendung einer zweiten Fahrzeuggeschwindigkeit zum Wiedereinschalten des Laserlichts vor, wobei die Einschaltgeschwindigkeit größer oder gleich der Ausschaltgeschwindigkeit ist. Anstatt die Laserlichtquelle bei Unterschreiten der unteren Grenzgeschwindigkeit vollständig zu deaktivieren nennen sie einen Betrieb bei geringerer Leistung als mögliche Lösung [WEBE15].
- Das System wird deaktiviert, sobald die Bordelektronik einen Unfall detektiert. Hierzu kann das Auslösesignal der Airbags genutzt werden.
- Das System wird deaktiviert, sobald Gegenverkehr durch die Fahrzeugkamera erkannt wird.

5.2.5 Gesamtsystem

Die in den Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.3 aufgezeigten Lösungen der Teilsysteme *Leuchtstoff*, *Optisches System* und *Lichtlenkung auf den Leuchtstoff* werden auf den folgenden Seiten

mit Hilfe eines morphologischen Kastens zu Systemen von Laserscheinwerfern kombiniert. Die möglichen Sicherheitskonzepte werden hier nicht berücksichtigt, da für jedes Konzept eines Laserscheinwerfers eine geeignete Lösung zur Steigerung der Lasersicherheit gewählt werden kann.

In Abbildung 5.3 sind alle Lösungen der Teilsysteme zusammengefasst. Aus der Vielzahl möglicher Kombinationen werden die drei mit Symbolen gekennzeichneten Kombinationen ausgewählt und eingehend analysiert. Auf den Einsatz von Lichtwellenleitern zur Umlenkung des Laserlichts wird zu Gunsten des Systemwirkungsgrades und unter Berücksichtigung der Umsetzbarkeit im Musterbau verzichtet.

Mit den drei ausgewählten Konzepten, die in Abbildung 5.4 dargestellt sind, soll die Lichtverteilung eines Zusatzfernlichts erzeugt werden, die sich vor allem durch eine hohe Lichtstärke im Zentrum auszeichnet. Bei allen Konzepten wird die Laserlichtquelle, wie von Bony und Hamami offengelegt, außerhalb des optischen Systems platziert [BONY12a].

In Konzept A wird ein Paraboloidreflektor in Rückprojektion genutzt, wobei sich der Leuchtstoff im Brennpunkt des Reflektors befindet. Die nahezu lambert'sche Abstrahlung des transmissiv eingesetzten Leuchtstoffs kann komplett vom Reflektor umgelenkt werden. Emissionen an der Anregungsseite des Leuchtstoffs hingegen müssen als Verlust betrachtet werden und führen zu Streulicht, das die Lichtverteilung negativ beeinflusst. Sollte der Leuchtstoff beschädigt werden, so tritt unbeabsichtigt nicht konvertierte und nicht gestreute Laserstrahlung aus dem System aus. Dieses kann bei Konzept A effektiv verhindert werden, indem die Stelle des Reflektors, welche im Schadensfall von dem Laserlicht getroffen wird, beispielsweise als Öffnung gestaltet oder geschwärzt wird. Nachteilig an diesem Konzept ist, dass die höchste Intensität des vom Leuchtstoff abgestrahlten Lichts nach einer relativ kurzen Wegstrecke auf den Reflektor trifft. Dadurch ist der Abbildungsmaßstab für diesen Teil des Lichtstroms, der ideal zur Erzeugung einer hohen Lichtstärke genutzt werden könnte, vergleichsweise schlecht (vergleiche Abschnitt 5.3.6).

Für Konzept B wird ein Paraboloidreflektor in Frontprojektion genutzt. Zur Verbesserung des Wirkungsgrads wird eine asphärische Linse hinzugefügt, welche den Teil des Lichtstroms, der am Reflektor vorbeigelangt, umlenkt. Der Laserstrahl wird über einen Umlenkspiegel auf den reflektiv eingesetzten Leuchtstoff gelenkt. Der Spiegel befindet sich an der Außenseite des Reflektors, so dass er keine Abschattung in dessen Strahlengang erzeugt. Stattdessen wird das Laserlicht durch eine Bohrung in das optische System gelenkt und auf den Leuchtstoff fokussiert. Durch die begrenzte Abstrahlung des Leuchtstoffs in den 2π -Halbraum wird der hinter dem Leuchtstoff befindliche Teil des Reflektors nicht zur Lichtumlenkung benötigt. Wird der Reflektor entsprechend gekürzt, so kann der Leuchtstoff sehr einfach an dessen hinterem Ende montiert werden. Die vorderen, weit vom Leuchtstoff entfernten Flächen des Reflektors können hervorragend zur Erzeugung einer hohen Lichtstärke genutzt werden. Die höchsten Lichtstärken treffen allerdings auf die Linse, deren Abbildungsmaßstab schlechter ist. Zur Erhöhung der Lasersicherheit sollte die Stelle des Reflektors, welche der Eintrittsbohrung

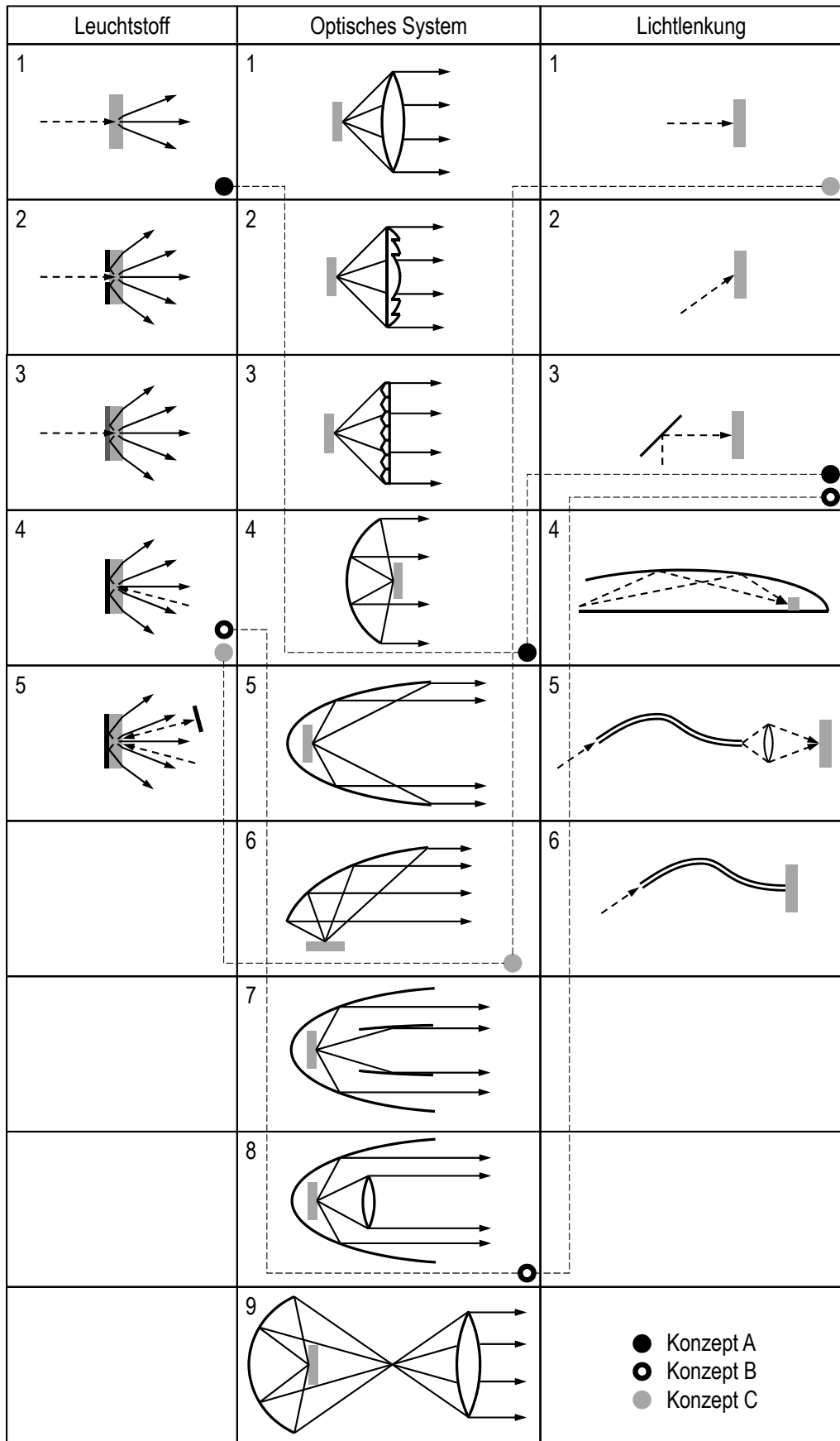


Abbildung 5.3: Morphologischer Kasten Laserscheinwerfer

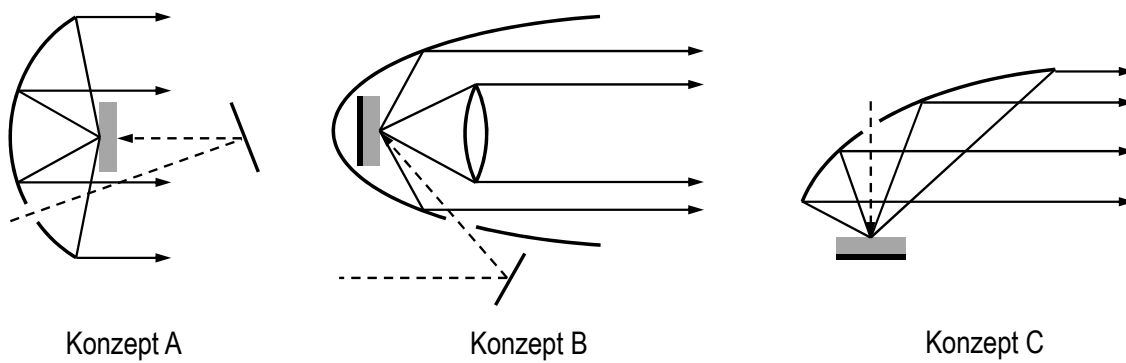


Abbildung 5.4: Ausgewählte Konzepte für Laserscheinwerfer

für die Laserstrahlung gegenüberliegt, als Absorber oder ebenfalls als Bohrung ausgeführt werden.

Konzept C nutzt als Off-axis-System einen asymmetrisch gestutzten Paraboloidreflektor. Der reflektiv eingesetzte Leuchtstoff wird senkrecht mit Laserstrahlung beaufschlagt, wozu eine Bohrung im Reflektor vorgesehen wird. Im Schadensfall des Leuchtstoffs wird das Laserlicht vom Leuchtstoffträger gerichtet reflektiert und verlässt das optische System durch die Bohrung im Reflektor. Werden in diesem Konzept mehrere Laserdioden genutzt, so muss auf eine Anregung des Leuchtstoffs unter anderen Winkeln ausgewichen werden. Der Abbildungsmaßstab nimmt bei diesem Ansatz entlang der im Schnitt dargestellten Reflektorfläche von links nach rechts ab. Dabei kann nicht alles vom Leuchtstoff abgestrahlte Licht durch den Reflektor umgelenkt werden. Eine Möglichkeit zur Justage des Laserspots auf den Leuchtstoff muss diesem Konzept hinzugefügt werden.

5.3 Wirkungsgrad von Paraboloidreflektoren für Lambertstrahler

Die meisten Lichtquellen strahlen in einen so großen Winkelbereich ab, dass viele optische Systeme nicht den gesamten Lichtstrom einsammeln und umlenken können. Zudem ist es nicht immer sinnvoll, ein System auf einen Wirkungsgrad von 100 % zu optimieren. Mit steigendem Wirkungsgrad eines optischen Systems nimmt bei unverändertem Abbildungsmaßstab der benötigte Bauraum zu.

In diesem Abschnitt wird der Wirkungsgrad der drei Konzepte aus Abschnitt 5.2.5 näher betrachtet. Die Paraboloidreflektoren werden mit einem idealisierten Lambertstrahler als Lichtquelle kombiniert, um Aussagen über Wirkungsgrad und Baugröße der Systeme treffen zu können. Dieser Lambertstrahler stellt eine gute Näherung für einen laseraktivierten Leuchtstoff dar. Einschränkungen dieser Annahme werden in Abschnitt 6.2.4 erläutert. Die Größe der Lichtemissionsfläche wird als deutlich kleiner als der Abstand zwischen Lichtquelle und optischem System angenommen, so dass die Fernfeldannahme gilt. Die betrachteten Paraboloidreflektoren sind Grundlage für eine Vielzahl von Beleuchtungssystemen, bei denen Licht

mehr oder weniger parallel abgestrahlt werden soll. Die Erkenntnisse aus dieser vereinfachten Betrachtung lassen sich somit direkt auf das zu konzeptionierende Zusatzfernlicht übertragen.

5.3.1 Emissionscharakteristik eines Lambertstrahlers

Die Emission des Lambertstrahlers ist normal zu dessen Oberfläche ($\varepsilon = 0$) am größten und nimmt gemäß

$$I = I_0 \cos \varepsilon \quad (5.1)$$

mit steigendem Winkel ε ab. Bei $\varepsilon = 60^\circ$ ist die Lichtstärke halb so groß wie bei $\varepsilon = 0$. Bei einem Winkel von $\varepsilon = 90^\circ$ ist schließlich keine Emission mehr vorhanden.

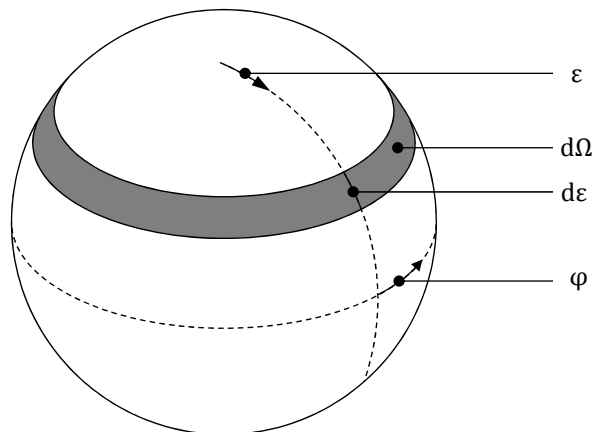


Abbildung 5.5: Ringsegment $d\Omega$ der Kugeloberfläche

Nachfolgend soll betrachtet werden wie groß der Anteil $d\Phi$ des Lichtstroms Φ ist, welcher in ein Kreissegment der Größe $d\Omega$ emittiert wird (vergleiche Abbildung 5.5). Der Anschaulichkeit halber werden Winkel im Text und in den Abbildungen im Gradmaß angegeben, in den Rechnungen hingegen wird das Bogenmaß verwendet. Für die Größe des Ringsegments $d\Omega$ aus Abbildung 5.5 gilt

$$d^2\Omega = \sin \varepsilon \, d\varphi \, d\varepsilon \quad (5.2)$$

$$d\Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \sin \varepsilon \, d\varphi \, d\varepsilon = 2\pi \sin \varepsilon \, d\varepsilon. \quad (5.3)$$

Gemäß Gleichung 2.9 gilt für den in dieses infinitesimal kleine Ringsegment emittierten Lichtstrom $d\Phi$

$$d\Phi = I \, d\Omega. \quad (5.4)$$

Das Einsetzen der Gleichungen 5.1 und 5.3 in diesen Ausdruck ergibt

$$d\Phi = I d\Omega = 2 I_0 \pi \sin \varepsilon \cos \varepsilon d\varepsilon = I_0 \pi \sin(2\varepsilon) d\varepsilon. \quad (5.5)$$

Dieser Zusammenhang beschreibt den Anteil am Lichtstrom eines Lambertstrahlers, der unter einem bestimmten Abstrahlwinkel ε emittiert wird. Die Funktion weist im relevanten Bereich zwischen $\varepsilon = 0^\circ$ und $\varepsilon = 90^\circ$ zwei Nullstellen an den Rändern dieses Bereichs auf. Bei $\varepsilon = 0^\circ$ ist die Lichtstärke I gleich null, bei $\varepsilon = 90^\circ$ ist hingegen der Raumwinkelbereich unendlich klein, in den das Licht abgestrahlt wird. Der Verlauf des Graphen ist zu $\varepsilon = 45^\circ$ symmetrisch. An dieser Stelle befindet sich das Maximum der Funktion. Folglich wird besonders viel Licht mit einem Abstrahlwinkel von etwa 45° emittiert, so dass diesem Bereich besondere Beachtung geschenkt werden muss. Zum einen sollte dieser Bereich, der einen hohen Anteil des Lichtstroms beinhaltet, von einem wirkungsgradstarken optischen System erfasst und umgelenkt werden. Zum anderen strahlen reale Lichtquellen nicht unter allen Winkeln die selbe Lichtfarbe ab. Der Bereich um $\varepsilon = 45^\circ$ ist für den integral von der Lichtquelle abgestrahlten Farbort besonders relevant. Eine nähere Betrachtung dieses Themas erfolgt in Abschnitt 6.2.4.

5.3.2 Geometrische und lichttechnische Größen an Paraboloidreflektoren

Anhand von Abbildung 5.6 werden die geometrischen Größen von Paraboloidreflektoren für Rück- und Frontprojektion eingeführt. Der zur optischen z-Achse rotationssymmetrische Reflektor weist die Brennweite f auf. Rückprojektion bedeutet dabei, dass die Lichtquelle mit Lambert'scher Abstrahlcharakteristik in den unteren Halbraum emittiert. Dies ist gleichbedeutend mit einem Emissionswinkel ε im Bereich von 90° bis 180° . Da nicht unbedingt alles von der Lichtquelle emittierte Licht vom Reflektor umgelenkt werden muss, lässt sich ein Kegel mit Öffnungshalbwinkel δ_R definieren, welcher den genutzten Winkelbereich darstellt. Dieses Reduzieren des Reflektordurchmessers bietet sich an, da der in den Bereich nahe $\varepsilon = 90^\circ$ abgestrahlte Lichtstrom sehr gering ist.

Soll der in Abbildung 5.6 skizzierte Reflektor hingegen für Frontprojektion eingesetzt werden, so muss die Lichtquelle um 180° gedreht werden, so dass sie in den oberen Halbraum emittiert. Der Reflektor für Frontprojektion wird von dem seitlich in den Winkelbereich $\varepsilon_1 < \varepsilon < 90^\circ$ abgestrahlten Licht getroffen. Der hintere Teil des Reflektors mit $z \leq 0$ wird nicht benötigt, da der Lambertstrahler kein Licht in diese Richtung emittiert. Entsprechend kann die Baulänge des Reflektors verkürzt werden. Ein Nutzen des direkt in z-Richtung abgestrahlten Lichts ist nicht möglich, da der Reflektor in diesem Fall unendlich groß sein müsste.

Für die nach unten abstrahlende Lichtquelle (Rückprojektion mit $90^\circ < \varepsilon < 180^\circ$) gilt gemäß Gleichung 5.5

$$d\Phi = -I_0 \pi \sin(2\varepsilon) d\varepsilon. \quad (5.6)$$

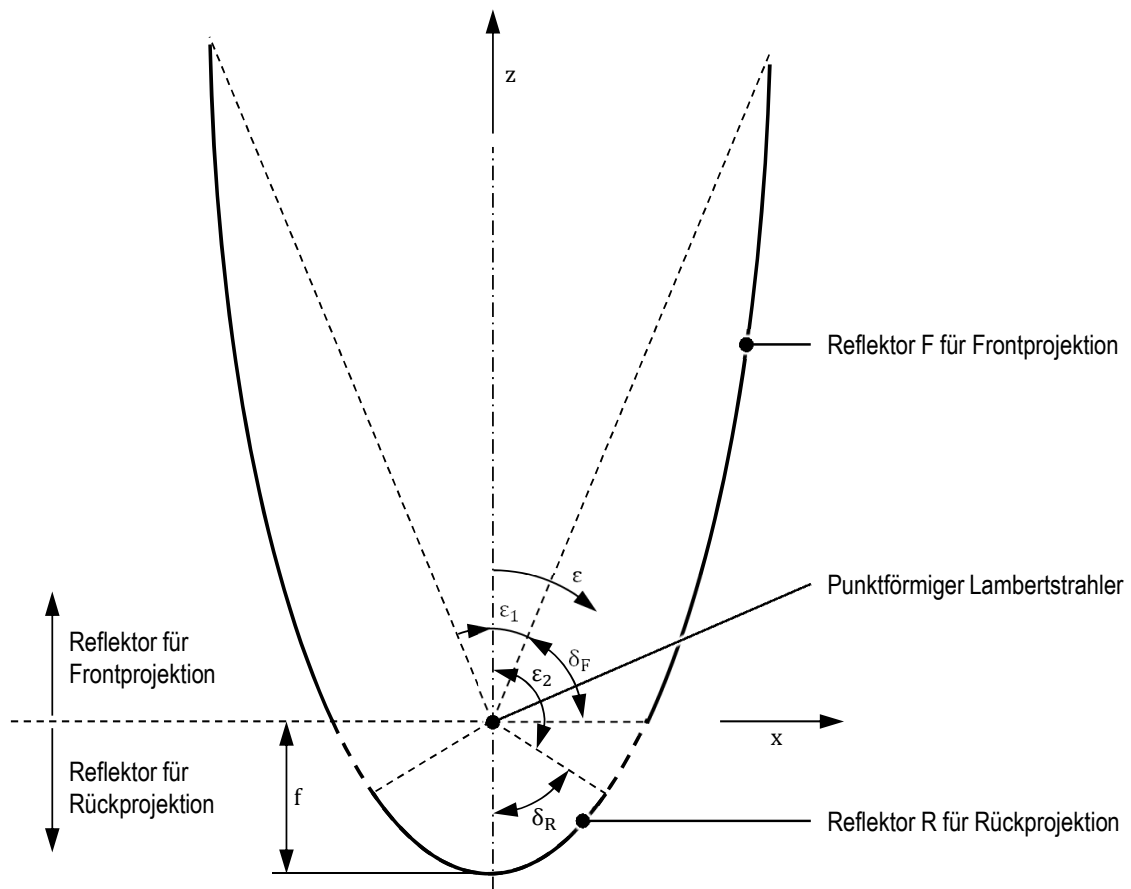


Abbildung 5.6: Paraboloidreflektoren für Front- bzw. Rückprojektion mit idealem Lambertstrahler

Durch Integration lässt sich der durch den Reflektor umgelenkte Lichtstrom bestimmen:

$$\Phi_R = \int_{\varepsilon_2}^{\pi} d\Phi = \int_{\varepsilon_2}^{\pi} -I_0 \pi \sin(2\varepsilon) d\varepsilon = \frac{I_0 \pi}{2} (1 - \cos(2\varepsilon_2)). \quad (5.7)$$

Bezogen auf den gesamten in den 2π -Halbraum emittierten Lichtstrom des Lambertstrahlers nach Gleichung 2.11 gilt

$$\frac{\Phi_R}{\Phi} = \frac{1}{2} (1 - \cos(2\varepsilon_2)). \quad (5.8)$$

Dieser Ausdruck ist der Anteil des gesamten Lichtstroms, welcher von ein Reflektor nach dem Konzept der Rückprojektion mit einem Erfassungswinkel von δ_R umgelenkt wird.

Ein Frontprojektionssystem hingegen lenkt den Lichtstrom Φ_F um, welcher in den Bereich $0 < \varepsilon < \varepsilon_1$ abgestrahlt wird. Mit Gleichung 5.5 gilt

$$\Phi_F = \int_{\varepsilon_1}^{\pi/2} d\Phi = \int_{\varepsilon_1}^{\pi/2} I_0 \pi \sin(2\varepsilon) d\varepsilon = \frac{I_0 \pi}{2} (1 + \cos(2\varepsilon_1)) \quad (5.9)$$

und entsprechend

$$\frac{\Phi_F}{\Phi} = 1 - \Phi_R = \frac{1}{2} (1 + \cos(2\varepsilon_1)). \quad (5.10)$$

5.3.3 Paraboloidreflektoren für Rückprojektion (Konzept A)

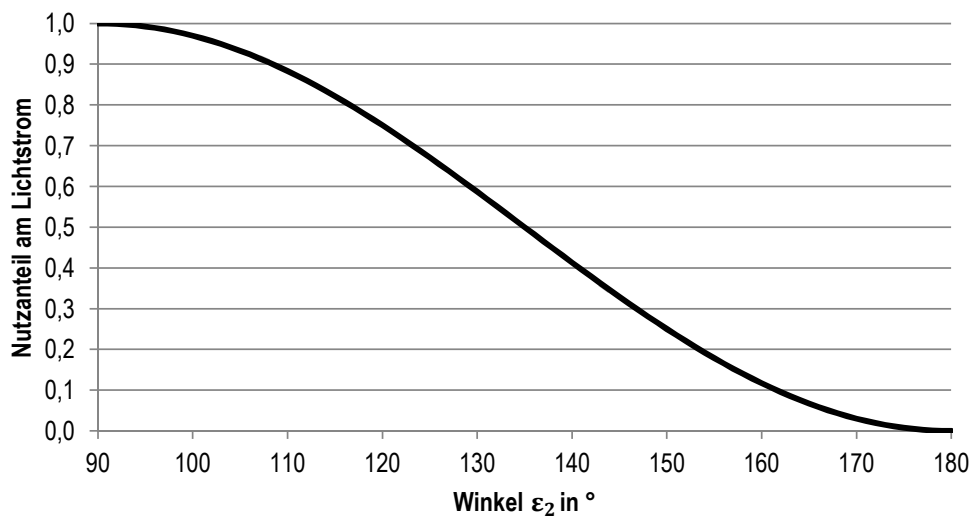


Abbildung 5.7: Genutztes Licht bei Rückprojektion

Der Verlauf der Funktion aus Gleichung 5.8 ist in Abbildung 5.7 wiedergegeben. Für Winkel ε_2 nahe 180° ist der Raumwinkel Ω_R des Kegels, in welchem das Licht genutzt wird, gemäß

$$\Omega_R = 2 \pi (1 - \cos \delta_R) = 2 \pi (1 + \cos \varepsilon_2) \quad (5.11)$$

nahezu Null. Erst ab $\varepsilon_2 < 175^\circ$ nimmt die Größe des genutzten Winkelbereichs und somit der Anteil des genutzten Lichtstroms merklich zu. Auf der anderen Seite gilt, dass bereits ab $\varepsilon_2 = 95^\circ$ der Nutzzanteil am Lichtstrom nahezu 100% ist. Gemäß Gleichung 5.11 nimmt zwar der Raumwinkel Ω_R in diesem Bereich von ε_2 näherungsweise linear zu, der in diesen Winkelbereich von $\varepsilon_2 \approx 90^\circ$ abgestrahlte Lichtstrom Φ ist jedoch so gering, dass er keinen nennenswerten Beitrag zum genutzten Lichtstrom Φ_R liefert, so dass der Nutzzanteil des Lichtstroms eine Sättigung erfährt.

Der Punkt P am Rand des Reflektors in Abbildung 5.8 ist der Schnittpunkt der Parabel nach Gleichung 5.12, welche die Kontur des Reflektors beschreibt, und der Geraden nach Gleichung 5.13, welche einen Lichtstrahl symbolisiert.

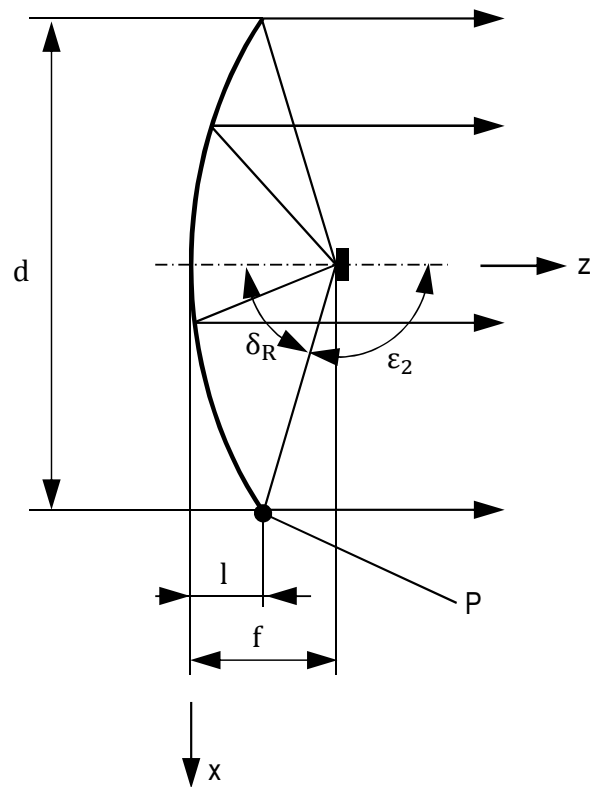


Abbildung 5.8: Dimensionen an einem Paraboloidreflektor für Rückprojektion

$$z = \frac{x^2}{4f} \quad (5.12)$$

$$z = f - \frac{x}{\tan \delta_R} \quad (5.13)$$

Einsetzen und Auflösen liefert den Ausdruck

$$x_{1,2} = 2f \left(-\frac{1}{\tan \delta_R} \pm \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \delta_R} + 1} \right) = \frac{2f}{\sin \delta_R} (-\cos \delta_R \pm 1), \quad (5.14)$$

der die Lösung einer quadratischen Gleichung darstellt und deswegen zwei Ergebnisse hat. Für Rückprojektion muss $z \leq f$ gelten und somit gemäß Gleichung 5.12 der Wert für x in den Grenzen $-2f \leq x \leq 2f$ liegen, weshalb nur der positive Wurzelausdruck berücksichtigt wird. Für den Durchmesser d des Reflektors gilt mit $d = 2x$

$$d = \frac{4f}{\sin \delta_R} (1 - \cos \delta_R). \quad (5.15)$$

Für die Länge l gilt gemäß Gleichung 5.13

$$l = f - \frac{d}{2 \tan \delta_R}. \quad (5.16)$$

Die Brennweite f skaliert die Größe des Reflektors linear und verbleibt als Konstante in den Formeln. Mit ihrer Hilfe kann der Abbildungsmaßstab des Systems bestimmt werden. In Abbildung 5.9 werden die Abmessungen des Reflektors deswegen als Vielfache von f angegeben (vergleiche Tabelle A.1 im Anhang). Es gilt

$$l^* = \frac{l}{f} \quad (5.17)$$

$$d^* = \frac{d}{f} \quad (5.18)$$

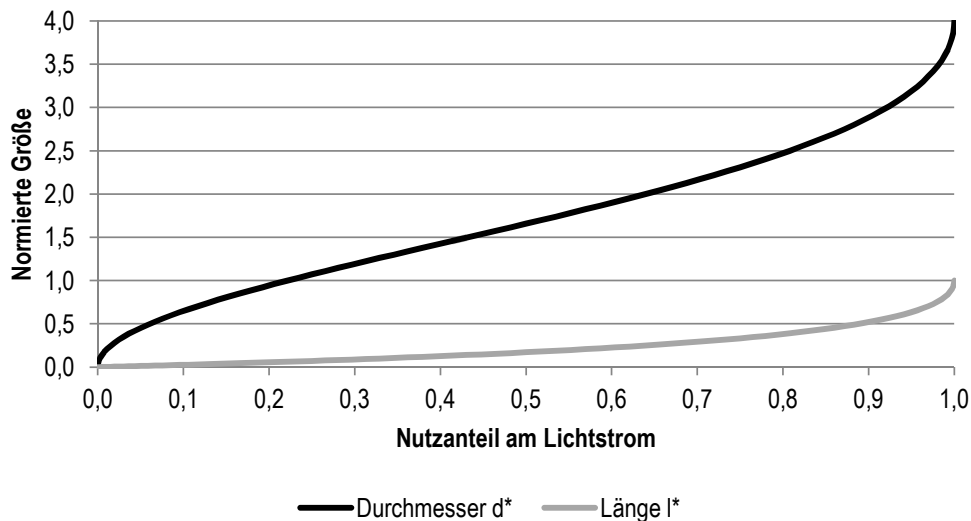


Abbildung 5.9: Durchmesser und Länge eines Paraboloidreflektors (als Vielfache der Brennweite f) in Abhängigkeit vom zu nutzenden Anteil des Lichtstroms

Die Änderung der Länge des Reflektors ist als unkritisch zu bewerten. Da bei Ansatz A aus Abschnitt 5.2.5 das Konzept der Rückprojektion genutzt wird, ist die Länge l des Reflektors maximal gleich dessen Brennweite f . Dieser Bauraum muss unabhängig von der tatsächlich gewählten Länge des Reflektors vorgesehen werden, um die Lichtquelle im Brennpunkt des Systems platzieren zu können und den Raum zwischen Lichtquelle und Reflektor für die Lichtpropagation freizuhalten.

Der Durchmesser d hingegen bestimmt die Größe des gesamten Systems maßgeblich. Hier gilt analog zu der Betrachtung des Akzeptanzwinkels δ_R , dass bereits ein geringfügig reduzierter Anteil am genutzten Licht die erforderliche Systemgröße merklich reduziert. Bereits ein tolerierter Verlust des Lichtstroms von 3 % reduziert den Durchmesser des Reflektors um 16 % (siehe Tabelle A.1). Dieser verbleibende Wirkungsgrad muss in Relation zu dem Wirkungsgrad des gesamten optischen Systems gesehen und mit dem Vorteil der reduzierten Baugröße abgewogen werden.

5.3.4 Paraboloidreflektor für Frontprojektion (Konzept B)

In einem ersten Schritt wird der Reflektor aus Konzept B ohne zusätzliche Linse betrachtet. Konzepte zur Steigerung des Wirkungsgrads des Paraboloidreflektors in Frontprojektion werden in Abschnitt 5.3.5 erläutert.

Für den Anteil des Lichtstroms, welcher von einem Frontprojektionssystem umgelenkt wird, gilt Gleichung 5.10:

$$\frac{\Phi_F}{\Phi} = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\varepsilon_1)) \quad (5.19)$$

mit ε_1 als Verlustwinkel des Systems.

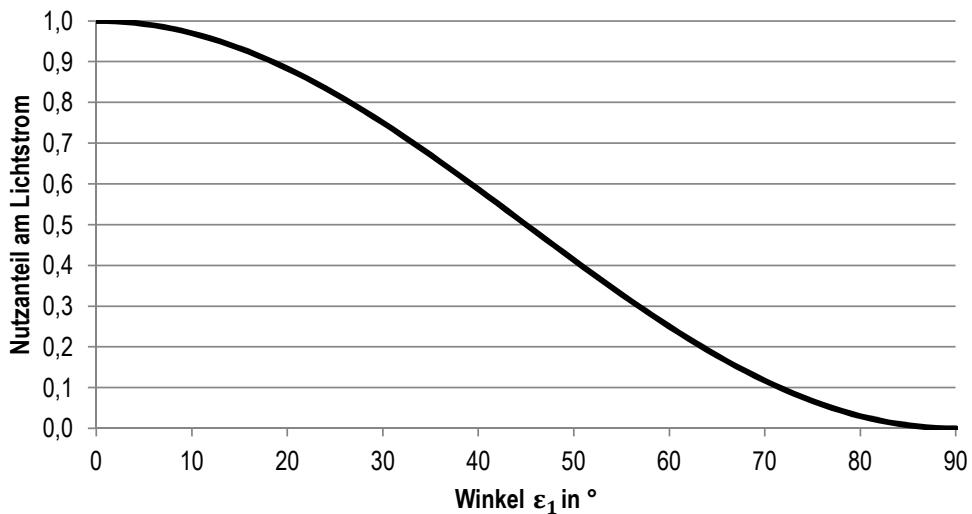


Abbildung 5.10: Genutztes Licht bei Frontprojektion in Abhängigkeit des Verlustwinkels ε_1

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Um einen Wirkungsgrad von nahezu 100 % zu erhalten, muss das System fast den gesamten Winkelbereich der Lichtemission umschließen. Ist der Verlustwinkel ε_1 größer als 20° , so sind bereits merkliche Einbußen im Wirkungsgrad zu verzeichnen.

Der Punkt P' am Rand des Reflektors in Abbildung 5.11 ist der Schnittpunkt der Parabel nach Gleichung 5.20 und der Geraden nach Gleichung 5.21, welche einen Lichtstrahl symbolisiert.

$$z = \frac{x^2}{4f} \quad (5.20)$$

$$z = f - \frac{x}{\tan \varepsilon_1} \quad (5.21)$$

Diese Gleichungen entsprechen exakt den Gleichungen 5.12 und 5.13, abgesehen davon dass die variable Größe hier ε_1 an Stelle von δ_R ist. Dementsprechend gilt auch Gleichung 5.14. Ferner

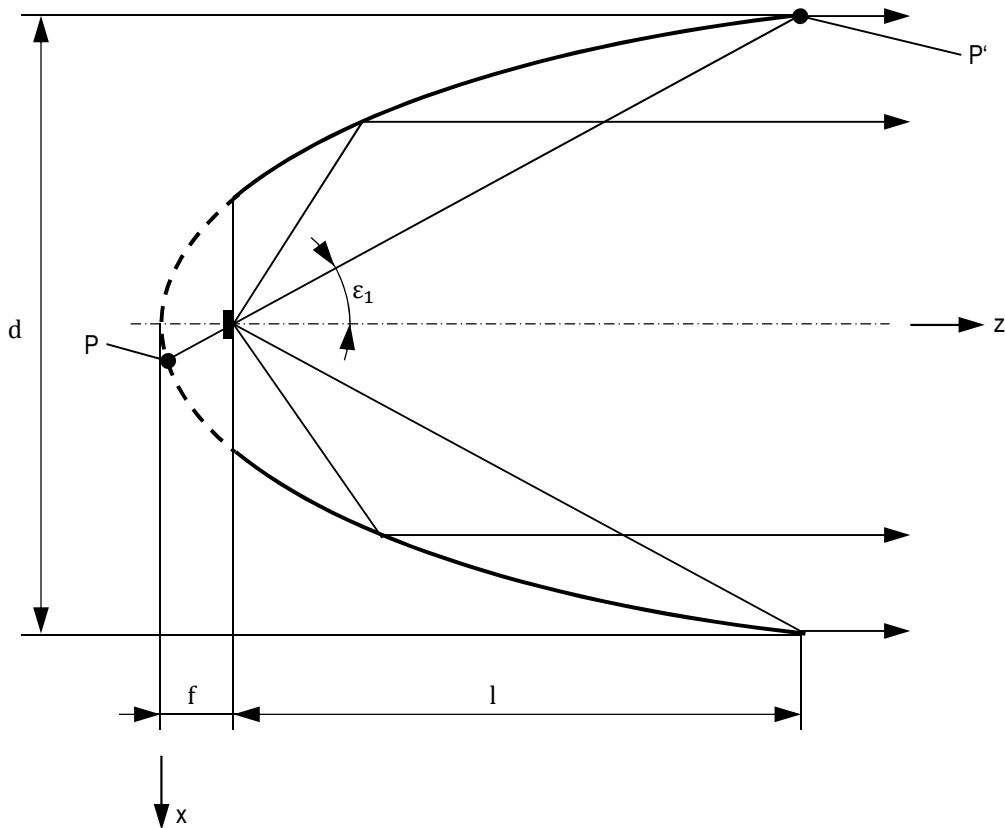


Abbildung 5.11: Dimensionen an einem Paraboloidreflektor (Frontprojektion) mit Verlustwinkel ε_1

gilt für die Lösung des Frontprojektionssystems $z \geq f$ (Punkt P' statt Punkt P). Deswegen handelt es sich um die Lösung von Gleichung 5.14 mit dem negativen Wurzelterm:

$$x = \frac{2 f_P}{\sin \varepsilon_K} (-\cos \varepsilon_K - 1) \quad (5.22)$$

Für den Durchmesser des Reflektors gilt mit $d_P = -2x$

$$d = \frac{4 f}{\sin \varepsilon_1} (1 + \cos \varepsilon_1) \quad (5.23)$$

und für dessen Länge entsprechend Gleichung 5.21

$$l = \frac{d}{2 \tan \varepsilon_1}. \quad (5.24)$$

Für einen Wirkungsgrad des Systems von beispielsweise 80 % ist laut Abbildung 5.12 ein Winkel ε_1 von $\approx 26,6^\circ$ nötig (vergleiche auch Tabelle A.2 im Anhang). Durchmesser und Länge eines solchen Reflektors sind jeweils etwa 17-mal so groß wie die Brennweite des Systems. Deutlich wirkungsgradstärkere Frontprojektionssysteme sind in den meisten Fällen nicht zweckmäßig,

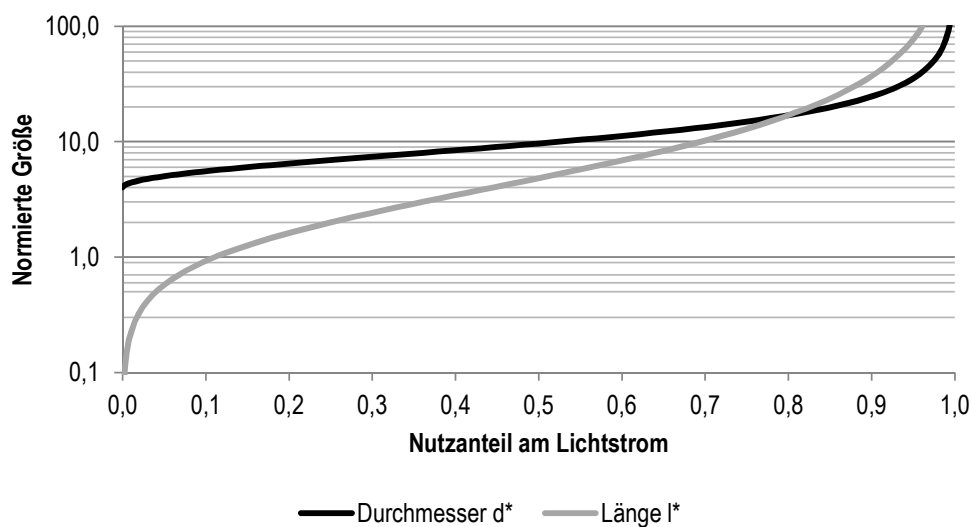


Abbildung 5.12: Durchmesser und Länge eines Paraboloidreflektors (als Vielfache der Brennweite f) in Abhängigkeit vom zu nutzenden Anteil des Lichtstroms

da die erforderliche Länge des Systems gegenüber dem Durchmesser überproportional steigt. Die Länge eines Reflektors, der 97 % des Lichtstroms erfassen soll, ist fast dreimal so groß wie dessen Durchmesser. Große Längen-zu-Durchmesser-Verhältnisse bewirken bei begrenztem Bauraum jedoch, dass der Reflektor für den Großteil des umgelenkten Lichts sehr schlechte Abbildungsmaßstäbe aufweist.

5.3.5 Verbesserung des Wirkungsgrads von Frontprojektionssystemen

Zur Verbesserung des Umlenkungswirkungsgrads von Frontprojektionssystemen lassen sich beispielsweise zwei Paraboloidreflektoren mit unterschiedlichen Brennweiten kombinieren (siehe Abbildung 5.13 A). Dazu wird innerhalb des bestehenden Reflektors ein kleinerer Reflektor so positioniert, dass beide Brennpunkte dort zusammenfallen, wo sich die Lichtquelle befindet. Für das in den Winkelbereich $\delta_{F,1}$ abgestrahlte Licht weist der größere Reflektor den besseren Abbildungsmaßstab auf. Deswegen wird der kleinere Reflektor mit der Brennweite f_2 so gestutzt, dass er dieses Licht nicht abschattet. Durch den zweiten Reflektor kann der Akzeptanzwinkel des Systems auf $\delta_{F,1} + \delta_{F,2}$ erhöht werden. Eine Erhöhung des Wirkungsgrads auf 100 % ist jedoch nicht möglich, auch nicht durch Einsatz weiterer Paraboloidreflektoren.

Das konzentrische, koaxiale Paraboloidsystem sollte so ausgelegt werden, dass der Außendurchmesser des kleinen Reflektors $d_{a,2}$ so groß ist wie der Innendurchmesser des großen Reflektors $d_{i,1}$, um ein wirkungsgradstarkes System zu erhalten. Wird der innere Reflektor zu groß gewählt, so wird Licht vom großen Reflektor auf die Rückseite des inneren Reflektors geworfen und unkontrolliert gestreut. Andererseits ist ein großer Reflektor wünschenswert, um einen guten Abbildungsmaßstab zu erreichen. Die Baulänge des inneren Reflektors sollte, wie in Abbildung 5.13 A dargestellt, die Länge l des Systems nicht vergrößern. Aus gestalterischen

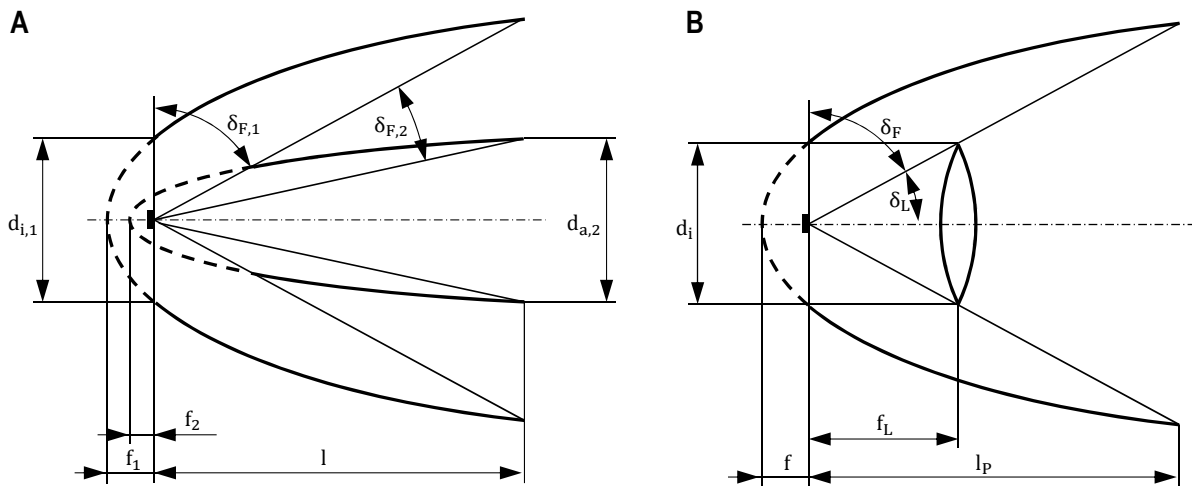


Abbildung 5.13: Verbesserung des Akzeptanzwinkels eines Paraboloidreflektors

A) zwei koaxiale Reflektoren, B) Kombination aus Reflektor und Linse

Gründen kann er unter Einbußen des Wirkungsgrads auch innerhalb des großen Reflektors enden. Ferner muss berücksichtigt werden, dass der Umlenkungsgrad durch notwendige Haltestrukturen für den kleinen Reflektor geringfügig reduziert wird.

Statt des inneren Paraboloidreflektors kann auch, wie in Abbildung 5.13 B dargestellt, eine Linse zur Steigerung des Wirkungsgrades genutzt werden. Analog zu den Überlegungen zur Platzierung des inneren Paraboloidreflektors aus Abbildungsteil A wird die Linse so positioniert, dass sie kein vom Reflektor umgelenktes Licht abschattet und andererseits möglichst groß ist, um eine hohe Brennweite f_L und damit einen guten Abbildungsmaßstab aufzuweisen. Zur Erzeugung von parallelem Licht befindet sich die Lichtquelle exakt im Brennpunkt der Linse. Der optimale Linsendurchmesser entspricht somit dem Innendurchmesser d_i des Paraboloidreflektors.

Über die hier vorgestellten Lösungen hinausgehend ist noch eine Vielzahl weiterer, aufwändigerer Lösungen denkbar. Die hier gezeigten Systeme basieren darauf, dass jeder Lichtstrahl von genau einem optischen Element umgelenkt wird. Ansätze, bei denen das Licht durch das Zusammenspiel mehrerer Bauteile umgelenkt wird wie beispielsweise Projektionsscheinwerfer (vergleiche Abschnitt 3.3.2) erfordern höhere Fertigungs- und Justagetoleranzen und werden deswegen an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die drei dargestellten Konzepte zur Frontprojektion weisen folgende Vor- und Nachteile auf:

Ein Reflektor

- + Einfaches System, keine Justage der optischen Komponenten zueinander notwendig.
- Begrenzter Wirkungsgrad
- Nicht umgelenktes Licht muss gegebenenfalls abgeschattet werden, um Blendung zu vermeiden.

Zwei koaxiale Reflektoren

- + Guter Abbildungsmaßstab für das vom Zusatzreflektor umgelenkte Licht
- ± Gegenüber dem Ausgangssystem verbesserter Wirkungsgrad, jedoch deutlich unter 100 %. Vor allem das direkt nach vorne emittierte Licht mit hoher Lichtstärke wird nicht genutzt.
- Nicht umgelenktes Licht muss gegebenenfalls abgeschattet werden, um Blendung zu vermeiden.

Reflektor und Linse

- + Wirkungsgrad fast 100 %
- + Lichtquelle ist durch Linse nur verzerrt sichtbar
- System besteht aus mindestens zwei Materialien (reflektiv und transmissiv)
- Linse führt zu Farbfehlern bei polychromatischem Licht
- Fresnelreflexion an der Linse wirft einen Teil des Lichts in den Reflektor zurück

Bei Zusatzfernlichtern ist nach ECE-Richtlinie 113 ein geringer Anteil an Streulicht zulässig, da für Fernlicht keine kritischen Obergrenzen der erzeugten Beleuchtungsstärke eingehalten werden müssen. Lediglich die maximale Beleuchtungsstärke von $I_{max} = 210.000 \text{ cd}$ ist vorgeschrieben, was einer Beleuchtungsstärke von $E_{max} = 344 \text{ lx}$ in 25 m Entfernung entspricht. Deswegen wird die Fresnel-Reflexion des Systems *Reflektor und Linse* als unkritisch bewertet. Dem erhöhten Aufwand durch den Einsatz von zwei Materialien, einem reflektiven und einem brechenden, steht ein Zugewinn an stilistischer Attraktivität durch das neuartige Erscheinungsbild gegenüber. Zu beachten ist ferner die chromatische Aberration der zusätzlichen Linse. Der erzeugte Farbsaum wird jedoch im fertig ausgearbeiteten Modul durch das vom Reflektor umgelenkte Licht überlagert und tritt deswegen geringer in Erscheinung als beispielsweise bei Projektionssystemen. Dieser Ansatz kommt in den Mustern I und II des Laserscheinwerfers in den Abschnitten 6.3 und 6.4 zum Einsatz.

5.3.6 Wendelbilder an Paraboloidreflektoren

Während in den vorangegangenen Abschnitten die Lichtquelle als unendlich klein angenommen wurde, wird auf den folgenden Seiten eine endlich ausgedehnte Lichtquelle betrachtet, deren Wendelbilder im Fernfeld des Reflektors entstehen. Im Folgenden sei angenommen, dass die Lichtquelle zwar endlich groß ist, jedoch im Vergleich zur Abmessung des Reflektors als klein angesehen werden kann.

In Abbildung 5.14 ist eine endlich ausgedehnte Lichtquelle mit Durchmesser d dargestellt, die sich im Brennpunkt eines Paraboloidreflektors befindet. Der hier dargestellte Schnitt durch die Rotationsachse des Reflektors dient der Betrachtung der Wendelbilder in radialer Richtung.

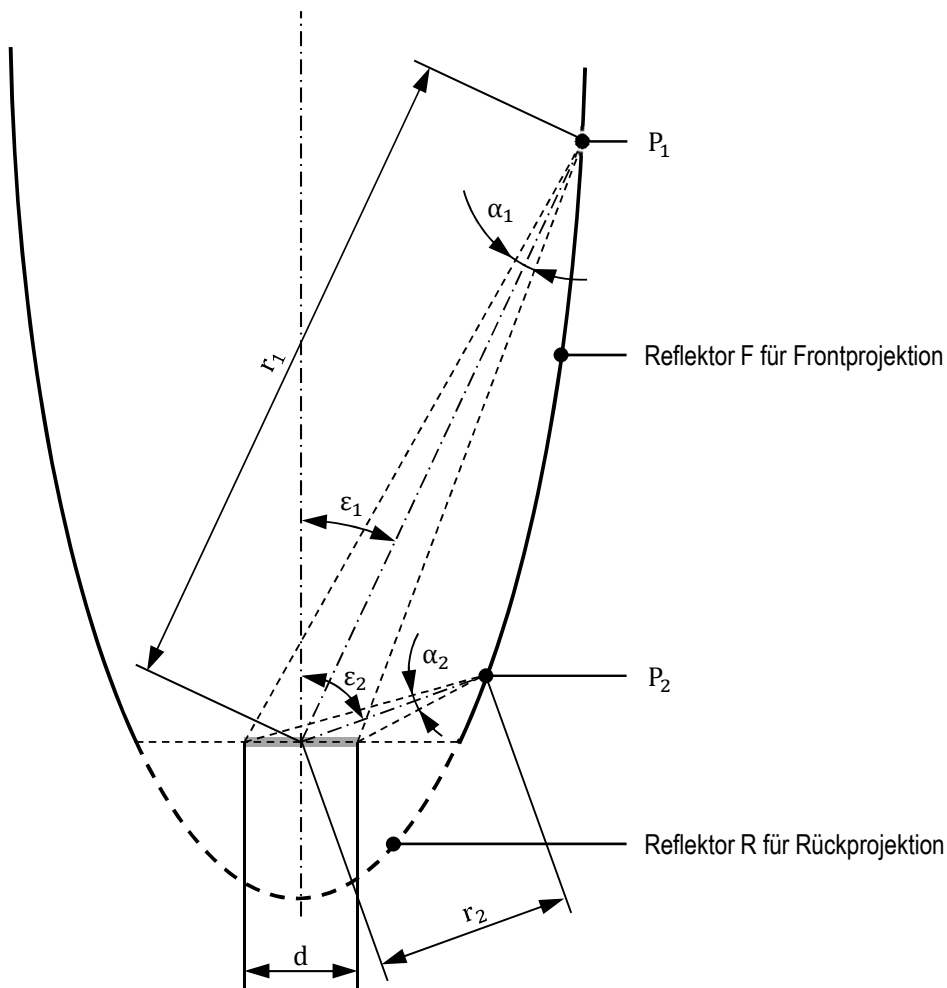


Abbildung 5.14: Strahlenbündel an einem Paraboloidreflektor mit ausgedehnter Lichtquelle

Das Licht, das den Reflektor im Punkt P_1 trifft, wird von der Lichtquelle näherungsweise unter dem Winkel ε_1 abgestrahlt. Da der Winkel ε_1 klein ist, erscheint die Lichtquelle von P_1 aus betrachtet perspektivisch kaum gestaucht. Wird die Lichtquelle hingegen von Punkt P_2 aus betrachtet, erscheint sie aufgrund der perspektivischen Verkleinerung elliptisch. Auf der anderen Seite ist der Abstand r_2 zwischen Lichtquelle und dem betrachteten Punkt des Reflektors deutlich kleiner als der Abstand r_1 zwischen Lichtquelle und Punkt 1.

Die Abhängigkeit des Abstandes r und der perspektivischen Verkleinerung der Lichtquelle vom Abstrahlwinkel ε sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Winkel zwischen 0° und 90° stehen für einen Reflektor nach dem Konzept der Frontprojektion. Bei Rückprojektion hingegen emittiert die Lichtquelle in den Bereich $90^\circ < \varepsilon < 180^\circ$, in dem sich der gestrichelte Teil des Reflektors in Abbildung 5.14 befindet. Der Übersichtlichkeit halber erfolgt die Darstellung der Konzepte Front- und Rückprojektion im selben Diagramm. Der Abstand r zwischen Lichtquelle und Punkt auf dem Reflektor ist als Vielfaches der Brennweite f angegeben, wodurch die Darstellung für beliebige Paraboloidreflektoren geeignet ist.

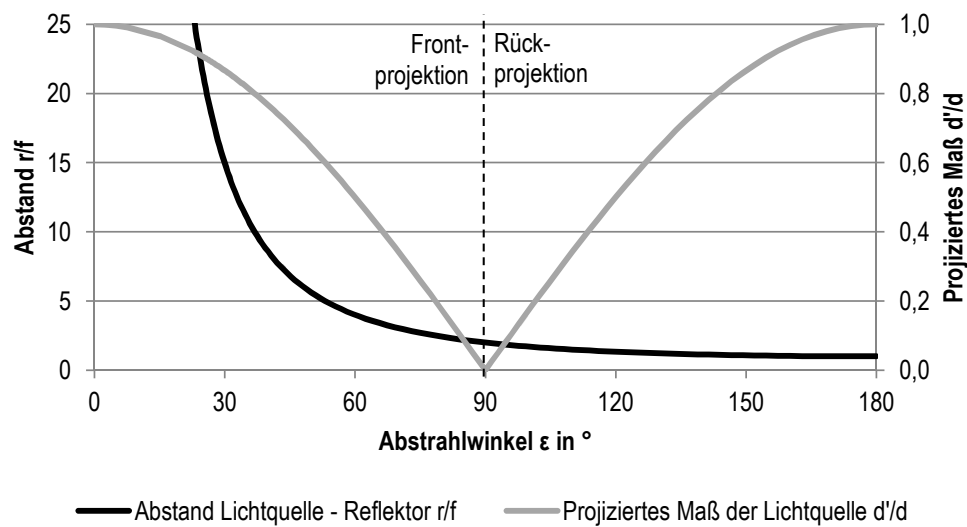


Abbildung 5.15: Parameter einer endlich ausgedehnten Lichtquelle in einem Paraboloidreflektor

Die Entfernung zwischen Lichtquelle und Reflektor ist bei kleinen Winkeln ε maximal und fällt mit steigendem Winkel stetig ab. Bei $\varepsilon = 180^\circ$ gilt schließlich $r = f$. Für die betrachtete Abmessung der Lichtquelle gilt die perspektivische Verzeichnung

$$d' = d |\cos \varepsilon|. \quad (5.25)$$

Umso kleiner der Öffnungswinkel α_R ist, desto kleiner sind die entstehenden Wendebilder in radialer Richtung. Unter der Annahme, dass der Durchmesser d der Lichtquelle klein ist gegenüber dem Abstand r zwischen Lichtquelle und betrachteten Punkt des Reflektors, gilt für den Öffnungswinkel

$$\alpha_R = \frac{d |\cos \varepsilon|}{r}. \quad (5.26)$$

Da die Ausdehnung d der Lichtquelle lediglich als Faktor in dieser Gleichung vorkommt, wird der mit dieser Größe und der Brennweite f normierte Öffnungswinkel α_R^* eingeführt. Es gilt

$$\alpha_R^* = \frac{\alpha_R f}{d} = \frac{f |\cos \varepsilon|}{r} = \frac{|\cos \varepsilon|}{r/f}. \quad (5.27)$$

Der Zähler dieses Bruches entspricht der perspektivischen Verkleinerung d'/d der Lichtquelle aus Abbildung 5.15. Der Nenner ist der normierte Abstand r/f zwischen der Lichtquelle und dem betrachteten Punkt des Reflektors. Der Verlauf der Funktion aus Gleichung 5.27, welche den radialen Öffnungswinkel α_R in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels ε beschreibt, ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Der auf der Ordinate aufgetragene Wert α_R^* stellt ein Maß für den Öffnungswinkel α_R dar, mit welchem das von der Lichtquelle abgestrahlte und vom Reflektor umgelenkte Licht einen Punkt des Reflektors verlässt.

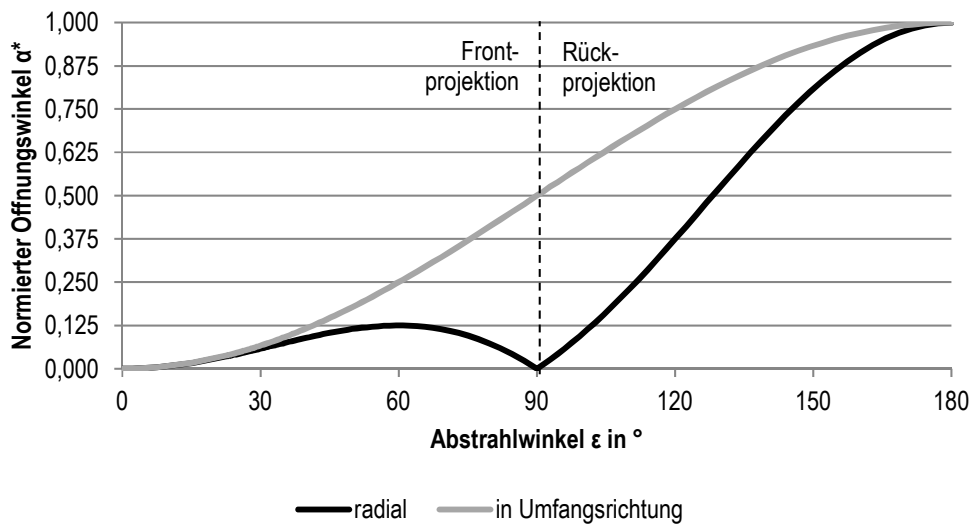


Abbildung 5.16: Öffnungswinkel an einem Paraboloidreflektor, radial und in Umfangsrichtung

Zunächst wird ein Paraboloidreflektor in Rückprojektion betrachtet ($90^\circ < \varepsilon < 180^\circ$). Das Licht, welches normal zur Oberfläche der Lichtquelle emittiert wird, trifft den Reflektor in dessen Rotationsmittelpunkt bei $\varepsilon = 180^\circ$. Einerseits erscheint die Lichtquelle von diesem Punkt aus betrachtet perspektivisch nicht verkleinert ($|\cos \varepsilon| = 1$), zum anderen ist der Abstand r zwischen diesem Punkt des Reflektors und der Lichtquelle am geringsten (vergleiche Abbildung 5.15). Folglich ist der normierte Öffnungswinkel mit $\alpha_R^* = 1$ für $\varepsilon = 180^\circ$ maximal.

Mit kleiner werdendem Abstrahlwinkel ε nimmt sowohl die perspektivische Stauchung der Lichtquelle als auch der Abstand zwischen ihr und dem betrachteten Punkt des Reflektors zu, so dass der Öffnungswinkel abnimmt. Bei $\varepsilon = 90^\circ$ gilt schließlich in radialer Richtung $\alpha_R^* = 0$.

Bei einem Frontprojektionssystem weist die Größe des radialen Öffnungswinkels zwei Nullstellen auf, wobei eine nur theoretischer Natur ist. Bei $\varepsilon = 90^\circ$ gilt analog zum System der Rückprojektion, dass die Lichtquelle als unendlich schmal erscheint ($|\cos \varepsilon| = 0$). Nähert sich ε hingegen 0° an, so steigt der Abstand zwischen Lichtquelle und Reflektor ins Unendliche. Das Erreichen des Punktes $\varepsilon = 0^\circ$ ist dabei nicht möglich. Zwischen diesen beiden Nullstellen erreicht die Funktion mit $\alpha_R^* = 0,125$ bei $\varepsilon = 60^\circ$ ein lokales Maximum.

In Umfangsrichtung hingegen hat nur noch der Abstand zwischen Reflektor und Lichtquelle einen Einfluss auf den Öffnungswinkel, da die Lichtquelle in dieser Richtung perspektivisch nicht verkleinert erscheint. Es gilt

$$\alpha_U^* = \frac{\alpha_U f}{d} = \frac{f}{r}. \quad (5.28)$$

Über dem Abstrahlwinkel ε aufgetragen ergeben sich für den Öffnungswinkel in radialer sowie in Umfangsrichtung die in Abbildung 5.16 dargestellten Zusammenhänge.

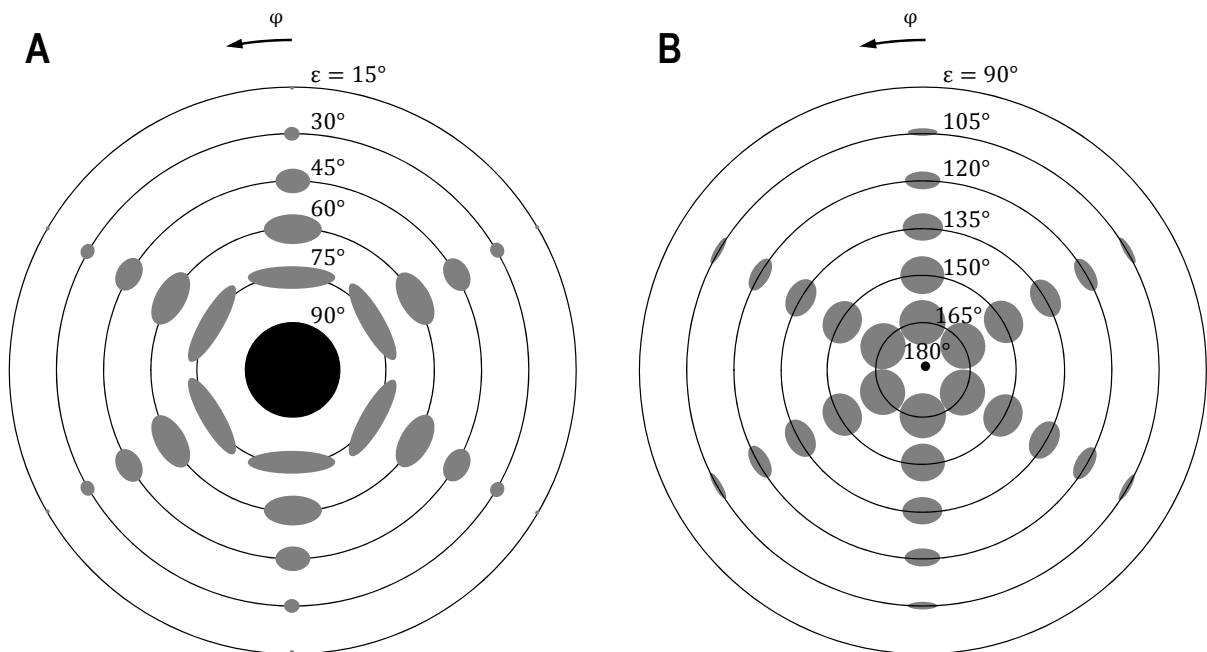


Abbildung 5.17: Wendelbilder an Paraboloidreflektoren, A) Frontprojektion, B) Rückprojektion

In Abbildung 5.17 sind die Wendelbilder, welche Paraboloidreflektoren von einer endlich ausgedehnten, kreisförmigen Lichtquelle erzeugen, dargestellt. Beide Teile der Abbildung stellen jeweils den Blick von vorne in den Reflektor dar, wobei sich die Lichtquelle in der Mitte befindet. Der schwarze Kreis im Zentrum von Bildteil A symbolisiert den nicht benötigten Teil des Reflektors bei Frontprojektion. Die Winkel ε und φ sind im Koordinatensystem von Lichtquelle und Reflektor definiert, weshalb der Winkel φ bei diesem Blick von vorne in das System links herum orientiert ist. Auf die Darstellung des Winkels $\varepsilon = 0^\circ$ wird verzichtet, da dieser theoretische Wert von keinem Frontprojektionssystem erreicht wird.

Die Wendelbilder sind an der Position im ε - φ -Koordinatensystem eingetragen, die dem betrachteten Punkt der Reflektoroberfläche entspricht. Die beiden Bildteile sind in sich maßstabsgetreu, wobei die tatsächliche Größe der Wendelbilder von der Brennweite des jeweiligen Reflektors abhängig ist. Ein Vergleich zwischen dem Front- und dem Rückprojektionssystem ist nur bei bekannter Brennweite der beiden Reflektoren möglich.

Bei Rotationsparaboloiden sind die Wendelbilder in ihrer Größe vom Umfangswinkel φ unabhängig, ändern ihre Ausrichtung jedoch in Abhängigkeit von φ . Die Abhängigkeit vom radialen Abstrahlwinkel ε entspricht der aus Abbildung 5.16. Exemplarisch sind für jeden gewählten Abstrahlwinkel sechs Wendelbilder dargestellt.

Mit einem Frontprojektionssystem lassen sich vor allem mit den äußeren Teilen des Reflektors scharfe Lichtverteilungen erzeugen. Die Wendelbilder bei niedrigen Abstrahlwinkeln ε sind klein und nahezu rotationssymmetrisch. Bei $\varepsilon = 15^\circ$ können die Abbilder der Lichtquelle in der Abbildung kaum dargestellt werden. Mit größer werdendem ε nimmt die Größe der Wendelbilder vor allem in Umfangsrichtung zu. Bei $\varepsilon = 60^\circ$ erreicht die radiale Größe der Wendelbilder ihr Maximum und geht für $\varepsilon = 90^\circ$ auf null zurück, was in der Abbildung nicht

dargestellt werden kann. Die Größe der Wendelbilder in Umfangsrichtung hingegen steigt stetig an, so dass für große Abstrahlwinkel ε stark verzerrte Abbildungen der Lichtquelle entstehen.

Die Größe der Wendelbilder in Umfangsrichtung ist in einem Rückprojektionssystem hingegen deutlich weniger veränderlich. Von $\varepsilon = 90^\circ$ bis $\varepsilon = 180^\circ$ verdoppelt sich ihre Ausdehnung in dieser Richtung. In radialer Richtung hingegen nimmt die Größe der Wendelbilder signifikant zu. Bei $\varepsilon = 90^\circ$ sind sie unendlich flach und somit nicht darstellbar, bei dem maximalen Winkel $\varepsilon = 180^\circ$, der hier ebenfalls nicht dargestellt ist, ergeben sich kreisrunde Abbilder der Lichtquelle.

5.3.7 Erzeugung von scharfen Hell-Dunkel-Grenzen

Zur Erzeugung einer scharfen, beispielsweise horizontalen Hell-Dunkel-Grenze lassen sich alle Teile des Reflektors nutzen, deren Wendelbilder in vertikaler Richtung eng begrenzt sind. In Abbildung 5.18 sind diese Bereiche angegeben, wobei der Darstellung der Grenzwert $\alpha^* = 0,12$ als maximale Ausdehnung eines Wendelbildes in vertikaler Richtung für das Front- und $\alpha^* = 0,7$ für das Rückprojektionssystem zu Grunde liegt. Da beide Darstellungen jeweils auf die Brennweite des Reflektors bezogen werden müssen, lassen sich die beiden Konzepte Front- und Rückprojektion nicht direkt miteinander vergleichen. Zur Bestimmung von α^* in vertikaler Richtung wird die maximale vertikale Ausdehnung eines beliebigen Wendelbildes bestimmt, wobei jedes Wendelbild die Form einer Ellipse aufweist.

Bei beiden Reflektoren kann der jeweils äußere, nicht eingefärbte Bereich zum Erzeugen einer Hell-Dunkel-Grenze in horizontaler oder vertikaler Richtung eingesetzt werden. Soll eine horizontale HDG erzeugt werden, eine Lichtverteilung mit starkem Gradienten in vertikaler Richtung, so können zusätzlich die mit H gekennzeichneten Zonen genutzt werden. Während der in diesem Fall nicht nutzbare innere Bereich beim Konzept der Frontprojektion nahezu kreisförmig ist, ist er bei Rückprojektion merklich oval. Zusätzlich zu diesem äußeren Bereich lassen sich bei Frontprojektionssystemen noch zwei kleine Bereiche nahe $\varepsilon = 90^\circ$ nutzen, auf die jedoch nur ein sehr geringer Anteil des Lichtstroms gelangt. Wie in Abschnitt 5.3.4 hergeleitet, kann zudem der Bereich nahe $\varepsilon = 0^\circ$ nicht genutzt werden, da kein Reflektor in Frontprojektion das direkt nach vorne abgestrahlte Licht erfassen und umlenken kann.

Analog dazu lässt sich zum Erzeugen einer vertikalen HDG die Zone B in Kombination mit der im Vergleich zum Bereich H um 90° rotierten Bereich V nutzen.

In Abbildung 5.19 wird das Beispiel einer rechteckigen Lichtverteilung betrachtet, welche an allen vier Kanten scharf begrenzt sein soll. Um den geforderten hohen Gradienten in der Lichtstärke am Rand des auszuleuchtenden Bereichs erzeugen zu können, müssen geeignete Zonen des Reflektors ausgewählt werden, um diesen Bereich zu beleuchten. Die mit H gekennzeichneten Bereiche erfordern einen hohen Gradienten der Lichtstärke in vertikaler Richtung. Hierfür kommen alle mit H oder mit B gekennzeichneten Bereiche der Reflektoren aus Abbildung 5.18 in Frage. Analog dazu muss die Strahlung, welche in den linken und rechten Seitenbereich der Lichtverteilung gelangen soll, durch die mit V oder B gekennzeichneten Zonen des Reflektors

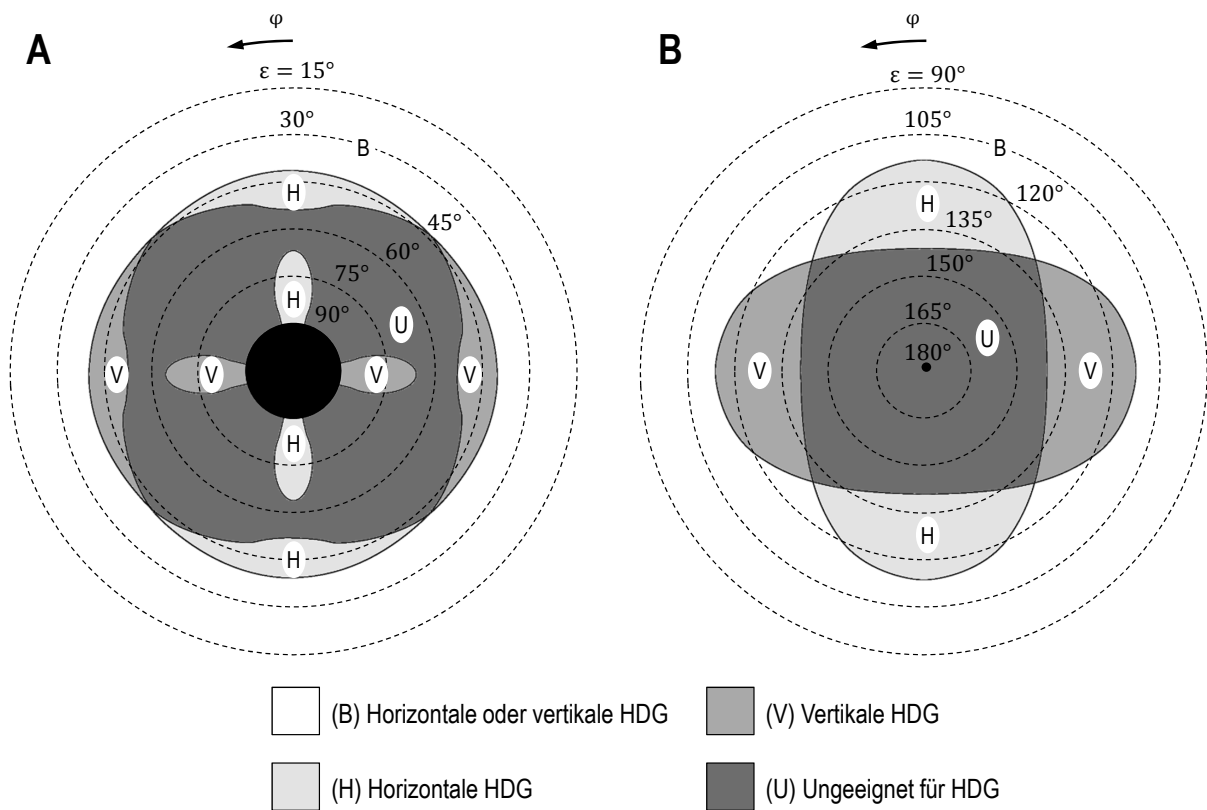


Abbildung 5.18: Nutzbare Bereiche zum Erzeugen einer scharfen Hell-Dunkel-Grenze,
A) Frontprojektion, B) Rückprojektion

umgelenkt werden. Die höchsten Anforderungen stellen die Ecken der Lichtverteilung, welche sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung eng begrenzte Wendebilder erfordern (Bereich B). Für den mittleren Teil der Lichtverteilung hingegen können alle Bereiche eines Reflektors genutzt werden.

Die Breite des Randbereichs, in dem höhere Anforderungen an den Reflektor gestellt werden als im Zentrum, ist von der tatsächlichen Größe der Wendebilder abhängig und hier nur exemplarisch eingezeichnet.

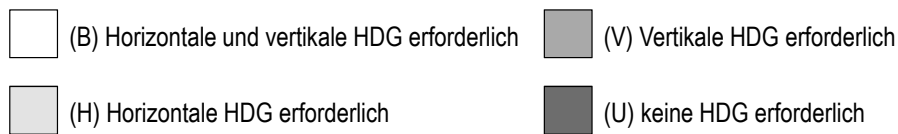
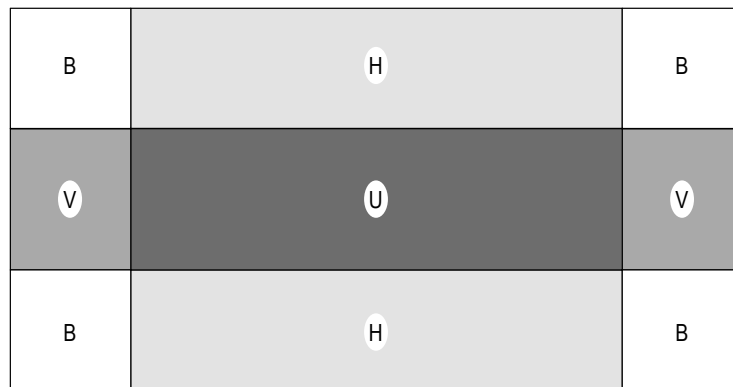


Abbildung 5.19: Zusammensetzen einer scharfen Lichtverteilung

5.3.8 Nicht-rotationssymmetrische Paraboloidreflektoren (Konzept C)

Das dritte Muster des Laserscheinwerfers wird als nicht-rotationssymmetrischer Reflektor gestaltet (vergleiche Abbildung 3.2 A). Die optische Achse des Reflektors R und die Normale der Lichtemissionsfläche N sind um den Neigungswinkel β verkippt, siehe Abbildung 5.20.

In der Praxis sind Bauraum und Design die begrenzenden Größen für die Abmaße eines Reflektors. Deswegen ist es vor allem bei einem asymmetrischen System zweckmäßig, nicht den Akzeptanzwinkel δ vorzugeben, sondern Abmessungen wie beispielsweise die Höhe h und Länge l des Reflektors. Aufgrund der Vielzahl der Parameter ist eine analytische Vorgehensweise, anders als bei den Konzepten der Rück- und Frontprojektion, nicht sinnvoll. Stattdessen wird eine Strahlengangssimulation genutzt, um geeignete Werte für die Brennweite f des Reflektors und den Neigungswinkel β zu bestimmen. Die der Berechnung zu Grunde liegenden Annahmen sind in Tabelle 5.6 aufgelistet.

Tabelle 5.6: Annahmen für die Simulation

Parameter	Bezeichnung	Wert
Länge des Reflektors	l	60 mm
Höhe des Reflektors	h	45 mm
Breite des Reflektors	b	45 mm
Reflexionsgrad des Reflektors	ρ	100 %
Lichtstrom der Lichtquelle	Φ	200 lm
Emissionsfläche der Lichtquelle	A	0,4 mm x 0,4 mm

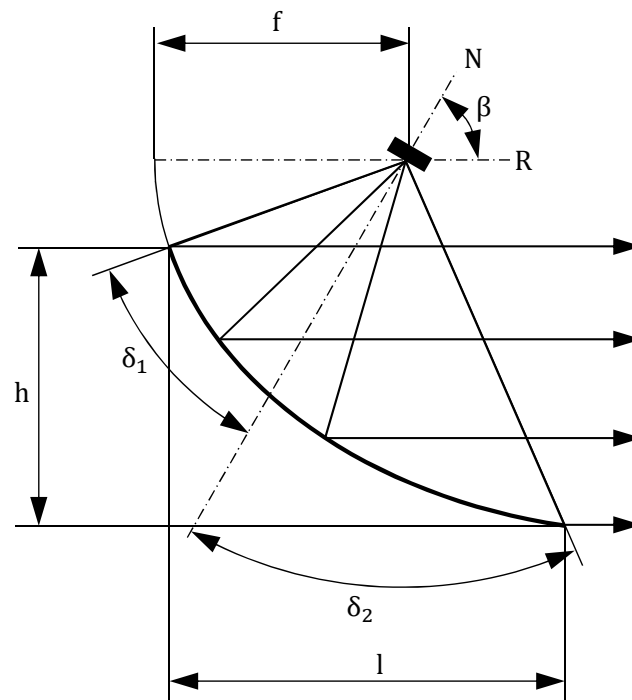


Abbildung 5.20: Dimensionen an einem asymmetrischen Paraboloidreflektor mit Neigungswinkel β

Die Simulation basiert auf einer Lichtquelle der Größe $A = 0,4 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm}$ mit lambert'scher Abstrahlcharakteristik. Der Reflexionsgrad des Reflektors und der Lichtstrom der Quelle stellen lediglich skalierende Größen dar. Sie beeinflussen die Simulationsergebnisse wie umgelenkter Lichtstrom und erzeugte Lichtstärke linear, ohne deren Relation zu verändern. Aus diesem Grund wird vereinfachend ein Reflexionsgrad von $\rho = 100 \%$ angenommen. Der Lichtstrom der Quelle wird mit $\Phi = 200 \text{ lm}$ festgelegt. Die selben Ergebnisse würden sich beispielsweise mit einem realistischen Reflexionsgrad von 94% und einer Abschlusscheibe mit einem Transmissionsgrad von 90% ergeben, wenn der Lichtstrom $\Phi = 236 \text{ lm}$ beträgt.

Je kleiner die Brennweite des Reflektors gewählt wird, desto größer ist der von ihm eingefangene Anteil des Lichtstroms. Für jede betrachtete Brennweite liegt das Maximum der in Abbildung 5.21 unten dargestellten Kurven jeweils bei einem Neigungswinkel von $90^\circ \leq \beta \leq 110^\circ$. Allerdings befindet sich das Maximum für die kürzesten Brennweiten am Ende des untersuchten Winkelbereichs, so dass es auch oberhalb von $\beta = 110^\circ$ liegen kann.

Eine hohe Beleuchtungsstärke stellt sich erwartungsgemäß bei hohen Brennweiten ein, da sie zu einem guten Abbildungsmaßstab führen. Eine zu große Brennweite jedoch bewirkt, dass der Reflektor nur einen geringen Teil des abgestrahlten Lichtstroms auffangen kann. Somit nimmt ab einer bestimmten Brennweite trotz verbessertem Abbildungsmaßstab die erzeugte Beleuchtungsstärke ab. Deshalb liefert der untersuchte Reflektor für die Brennweiten $f = 10,0 \text{ mm}$ und $f = 12,5 \text{ mm}$ nahezu die gleiche Beleuchtungsstärke. Das Maximum der Kurven in Abbildung 5.21 oben liegt bei $\beta = 80^\circ$, nur für $f = 5,0 \text{ mm}$ befindet es sich bei $\beta = 40^\circ$.

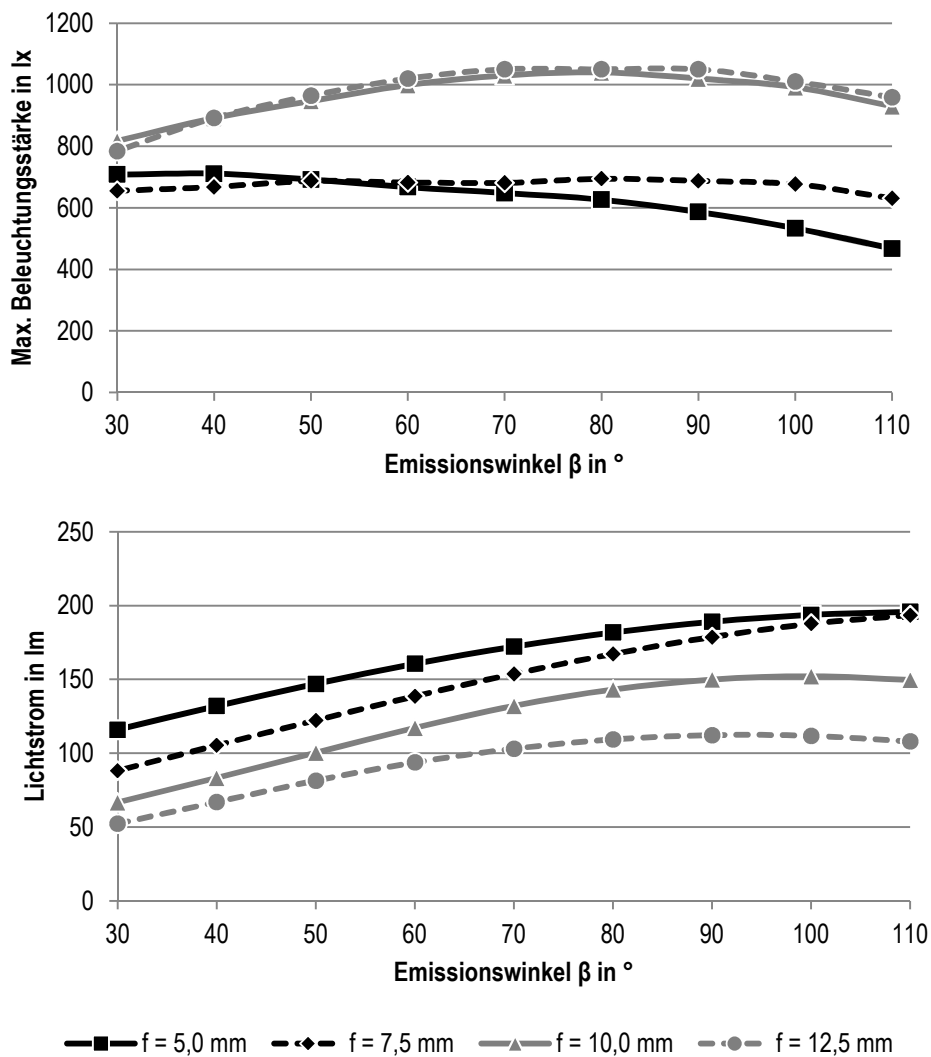


Abbildung 5.21: Lichtstrom und maximale Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung in Abhängigkeit von Brennweite f und Neigungswinkel β

Ziel ist ein guter Kompromiss zwischen hohem Lichtstrom und hoher Beleuchtungsstärke. Deswegen wird für das neue Muster eine Brennweite von $f = 10,0$ mm gewählt. Mit dieser Brennweite kann nahezu die maximal mögliche Beleuchtungsstärke erzeugt werden. Damit werden Einbußen am Lichtstrom in Kauf genommen, um das Potential der laserbasierten Beleuchtungseinrichtung, die Erzeugung hoher Beleuchtungsstärken, besser herausstellen zu können.

Ein Neigungswinkel von $\beta = 90^\circ$ liefert sowohl für die Beleuchtungsstärke als auch für den Lichtstrom gute Werte. Des Weiteren ist ein rechter Winkel fertigungstechnisch am besten handhabbar.

Das optimale System mit $\beta = 90^\circ$ und $f = 10,0$ mm liefert einen Lichtstrom von $\Phi = 149,9$ lm mit einer maximalen Beleuchtungsstärke von $E_{max} = 1020$ lx.

6 Versuche und Versuchsauswertungen

In diesem Kapitel werden drei unterschiedliche Laserscheinwerfer aufgebaut und vermessen. Hierzu erfolgt in den Abschnitten 6.1 und 6.2 zunächst eine Charakterisierung der eingesetzten Laserdioden und möglicher Leuchtstoffe. Die Untersuchungen der Laserdioden bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen und -strömen ermöglichen die Definition einer für den Einsatz im Fahrzeug sinnvollen Obergrenze des Betriebsstroms. Anhand der Breite des Diodenspektrums bei unterschiedlichen Betriebszuständen wird abgeschätzt, ob mit unerwünschten Speckles im Lichtbild des Scheinwerfers gerechnet werden muss. Die Untersuchung verschiedener Leuchtstoffe ermöglicht die Definition von Anforderungen an ein Konvertermaterial für Fahrzeuganwendungen sowie an das optische System des Scheinwerfers.

In den Abschnitten 6.3 bis 6.5 werden drei Prototypen eines Laserscheinwerfers für Kraftfahrzeuge vorgestellt. Zwei der Muster werden als Frontprojektionssysteme ausgearbeitet, in welchen eine zusätzliche Linse den Wirkungsgrad erhöht. Anhand von Messergebnissen und Erfahrungswerten des jeweiligen Musterstandes wird dabei das Optimierungspotential für die nächste Version hergeleitet. Das Hauptaugenmerk der Verbesserungen liegt auf der erzeugten Lichtverteilung und der thermischen Anbindung der Laserdioden, welche eine Einstellbarkeit des Strahlengangs ermöglichen muss. Die dritte Version basiert schließlich auf einem asymmetrischen Reflektor und kommt ohne zusätzliche Linse aus.

6.1 Laserdioden

In den folgenden zwei Unterabschnitten werden Messergebnisse des Wirkungsgrads und der Kohärenzlänge der eingesetzten blauen Laserdioden präsentiert. Letztere ist eine wichtige Größe, um die Entstehung von Speckles abschätzen zu können. Auf den Einfluss der Betriebstemperatur auf das von der Diode emittierte Spektrum wird ebenfalls in Abschnitt 6.1.2 eingegangen.

6.1.1 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von Laserdioden hängt maßgeblich von deren Betriebsumgebungen ab. Vor allem die Gehäusetemperatur der Diode und der applizierte Betriebsstrom haben einen deutlichen Einfluss auf ihre Effizienz. Für den Einsatz im Fahrzeugscheinwerfer, welcher Temperaturen von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ umfasst, sind aktuelle Laserdioden allerdings nicht ausgelegt.

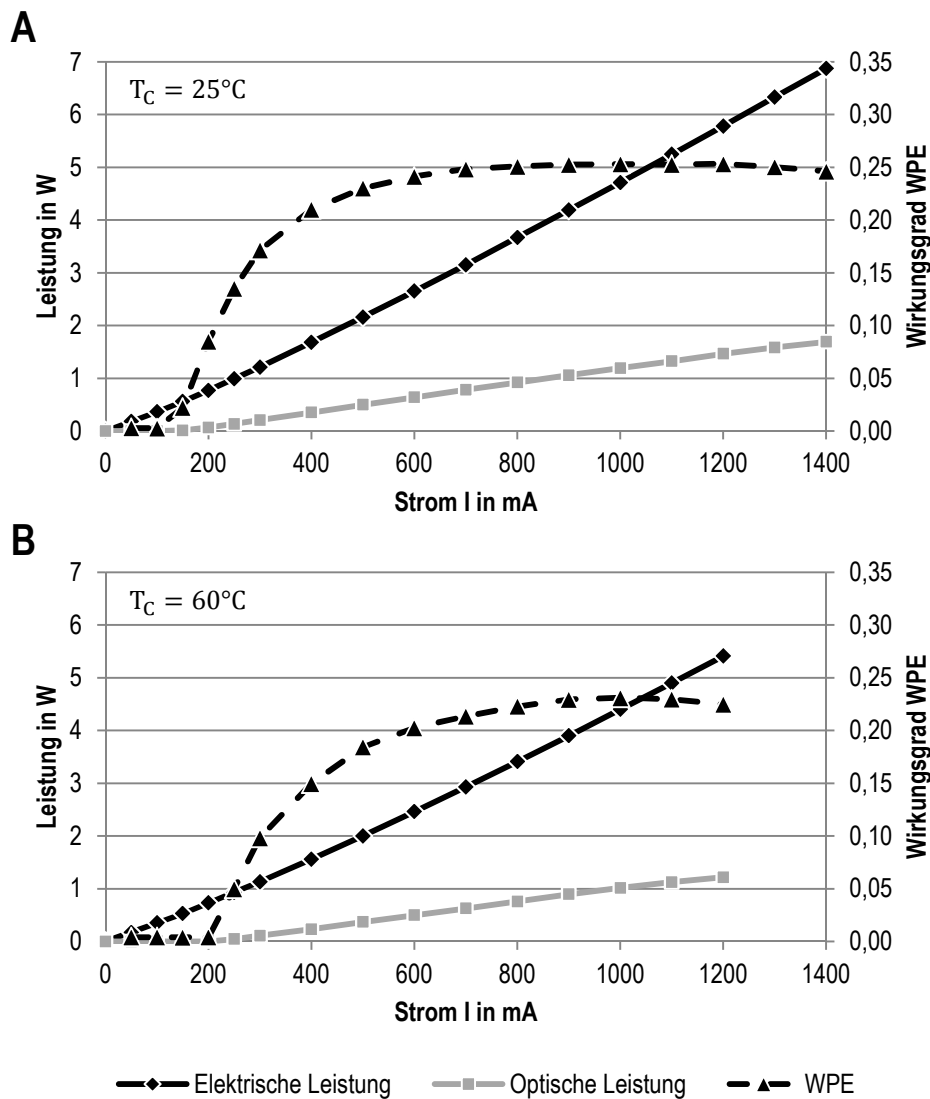


Abbildung 6.1: Optische Ausgangsleistung und WPE einer Laserdiode in Abhängigkeit des Betriebsstroms bei konstanter Gehäusetemperatur von A) 25°C , B) 60°C

In Abbildung 6.1 ist die optische Ausgangsleistung der blauen Laserdiode Osram *PL-TB450B* sowie die elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Betriebsstroms dargestellt. Der Quotient beider Werte ergibt den Wirkungsgrad (WPE, *Wall-plug-efficiency*) der Diode (vergleiche [LACH14d]).

Die von der Betriebstemperatur abhängige Laserschwelle liegt bei einer Gehäusetemperatur der Diode von $T_C = 25^\circ\text{C}$ bei etwa 150 mA . Unterhalb dieses Stroms strahlt die Diode wie eine LED Photonen nach dem Mechanismus der spontanen Emission ab, allerdings mit einem sehr geringen Wirkungsgrad. Beim Überschreiten der Laserschwelle steigt die optische Ausgangsleistung zunächst linear an. Die aufgenommene elektrische Leistung nimmt über dem gesamten vermessenen Bereich leicht überproportional zu, wobei das Überschreiten der Laserschwelle keine Auswirkung auf diesen Verlauf hat. Der Wirkungsgrad der Diode ist für Betriebsströme knapp oberhalb der Laserschwelle gering, da hierbei nur wenig Licht emittiert wird, die Leistungsaufnahme jedoch bereits deutlich angestiegen ist. Bei höheren Betriebsströmen steigt die

optische Ausgangsleistung nicht mehr linear an. Stattdessen ist ein leicht unterproportionaler Zusammenhang zwischen Ausgangsleistung und Betriebsstrom auszumachen. Eine Ursache hierfür ist die steigende Junctiontemperatur T_J der Diode, welche gemäß

$$T_J = T_C + P_V R_{th,JC} = T_C + (P_{el} - P_{opt}) R_{th,JC} \quad (6.1)$$

linear von der Verlustleistung P_V der Diode abhängig ist. Die Verlustleistung ist dabei die Differenz von aufgenommener elektrischer Leistung P_{el} und abgestrahlter optischer Leistung P_{opt} . Der Wirkungsgrad der Laserdiode weist somit ein Maximum auf, das typischerweise unterhalb des maximal zulässigen Betriebsstroms liegt. Bei der hier eingesetzten Diode beträgt der maximale Betriebsstrom 1,6 A [OSRA13a].

Laserdioden sollten wie auch LEDs mit einem geregelten Strom betrieben werden, da mit einer Spannungsregelung das sichere Halten eines Betriebszustandes nicht möglich ist. Soll die Ausgangsleistung der Laserdiode reduziert werden, so ist eine Zurücknahme des Stromes im Bereich zwischen dem maximalen Wirkungsgrad und dem Nenn-Betriebsstrom sinnvoll. Weiter heruntergeregelt sollte der Strom im cw-Betrieb nicht werden. Statt dessen ist eine PWM-Steuerung sinnvoll, bei der mit hoher Frequenz zwischen dem Strom, bei dem der Wirkungsgrad maximal ist, und dem ausgeschalteten Zustand gewechselt wird. Durch Anpassen der Pulsweite lassen sich so nahezu beliebige optische Ausgangsleistungen mit hohem Wirkungsgrad realisieren.

Mit steigender Gehäusetemperatur T_C steigt die zum Überschreiten der Laserschwelle benötigte Stromstärke I_{th} an, die optische Ausgangsleistung sinkt (vergleiche Abbildung 6.1 B).

Der Hersteller gibt für die eingesetzte Laserdiode eine maximale Junctiontemperatur von $T_J = 150^\circ\text{C}$ an. Bei Langzeitbetrieb hingegen soll $T_J = 100^\circ\text{C}$ nicht überschritten werden [OSRA13a]. Zusammen mit dem thermischen Widerstand der Diode von $R_{th,JC} = 15\text{ K/W}$ ergibt sich eine maximal zulässige Verlustleistung von

$$P_V = \frac{T_J - T_C}{R_{th,JC}}. \quad (6.2)$$

Für eine Gehäusetemperatur von $T_C = 60^\circ\text{C}$ liegt die maximal im Langzeitbetrieb zulässige Verlustleistung bei

$$P_V = \frac{T_J - T_C}{R_{th,JC}} = \frac{100^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{15\text{ K/W}} = 2,67\text{ W}, \quad (6.3)$$

im Kurzzeitbetrieb ist hingegen eine Verlustleistung von

$$P_V = \frac{T_J - T_C}{R_{th,JC}} = \frac{150^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{15\text{ K/W}} = 6,0\text{ W} \quad (6.4)$$

tolerierbar. Wie in Abbildung 6.1 B dargestellt beträgt die Verlustleistung der Diode bei dieser Gehäusetemperatur und einem auf 1200 mA reduzierten Betriebsstrom $4,19\text{ W}$, so dass lediglich ein diskontinuierlicher Betrieb möglich ist. Um eine thermische Schädigung der Diode zu vermeiden, endet die dargestellte Messreihe bereits bei diesem Betriebsstrom von 1200 mA . Der maximale Betriebsstrom, bei dem die Verlustleistung unterhalb von $2,67\text{ W}$ liegt und somit Dauerbetrieb möglich ist, beträgt 800 mA .

Ein Einsatz der Dioden bei bis zu 80°C Umgebungstemperatur, wie für den Einsatz im Fahrzeugscheinwerfer gefordert, reduziert den zulässigen Betriebsstrom weiter. Dabei muss berücksichtigt werden, dass in der Praxis die Gehäusetemperatur durch den endlichen thermischen Widerstand des Kühlkörpers und der Verbindung zwischen Kühlkörper und Diode über der Umgebungstemperatur liegt, woraus eine weitere Abnahme des zulässigen Betriebsstroms folgt. Für die in dieser Arbeit betrachteten Musterscheinwerfer wird ein maximaler Betriebsstrom der Laserdioden von $I_{max} = 600\text{ mA}$ festgelegt. Wie oben beschrieben empfiehlt sich der Einsatz einer PWM-Regelung, um einen mittleren Betriebsstrom von 600 mA bei möglichst hohem Wirkungsgrad der Laserdiode einzustellen.

6.1.2 Spektrum und Kohärenz

Mit einem Monochromator des Typs *Ando AQ-6315* mit einer spektralen Auflösung von $\Delta\lambda = 0,02\text{ nm}$ wird das Spektrum des eingesetzten Laserdiodentyps bei unterschiedlichen Betriebszuständen vermessen. Einerseits sollte sich die Emission der Diode bei jedem in Frage kommenden Betriebszustand innerhalb des Spektralbereichs befinden, bei dem der Leuchtstoff effektiv angeregt werden kann. Andererseits lässt sich aus dem Wellenlängenspektrum die Kohärenzlänge der Diode bestimmen. Diese ist zur Abschätzung von Interferenzeffekten im System Laserscheinwerfer relevant.

Um möglichst alle von der Diode emittierten Moden und folglich die gesamte Breite des abgestrahlten Spektrums mit dem Monochromator zu erfassen, wird das von der Halbleiterlichtquelle abgestrahlte Licht zunächst kollimiert und vor dem Eingang des Messgeräts mit Hilfe zweier Diffusoren durchmischt. Ein gleichmäßiges Erfassen aller Moden ist jedoch nicht möglich, so dass das reale Spektrum minimal breiter als das ermittelte ist. Der Versuchsaufbau mit zwei Diffusoren ist stark verlustbehaftet, so dass die Diode nicht in der Nähe ihrer Laserschwelle vermessen werden kann.

In einer ersten Messreihe wird die Diode mit konstanter Stromstärke im Bereich von 400 mA bis 1200 mA betrieben. Die Gehäusetemperatur beträgt, wie in Abschnitt 6.1, 25°C beziehungsweise 60°C . Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Mit steigendem Betriebsstrom sowie steigender Gehäusetemperatur nimmt die Emissionswellenlänge der Diode im cw-Betrieb zu. Im untersuchten Rahmen schwankt die Peakwellenlänge dabei um 6 nm . Diese Abweichung hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Konversionsrate von YAG:Ce, da dessen Anregungskurve im Bereich um 450 nm kaum von der Wellenlänge abhängt (vergleiche Abbildung 4.8). Die Veränderung der Emissionswellenlänge der Diode be-

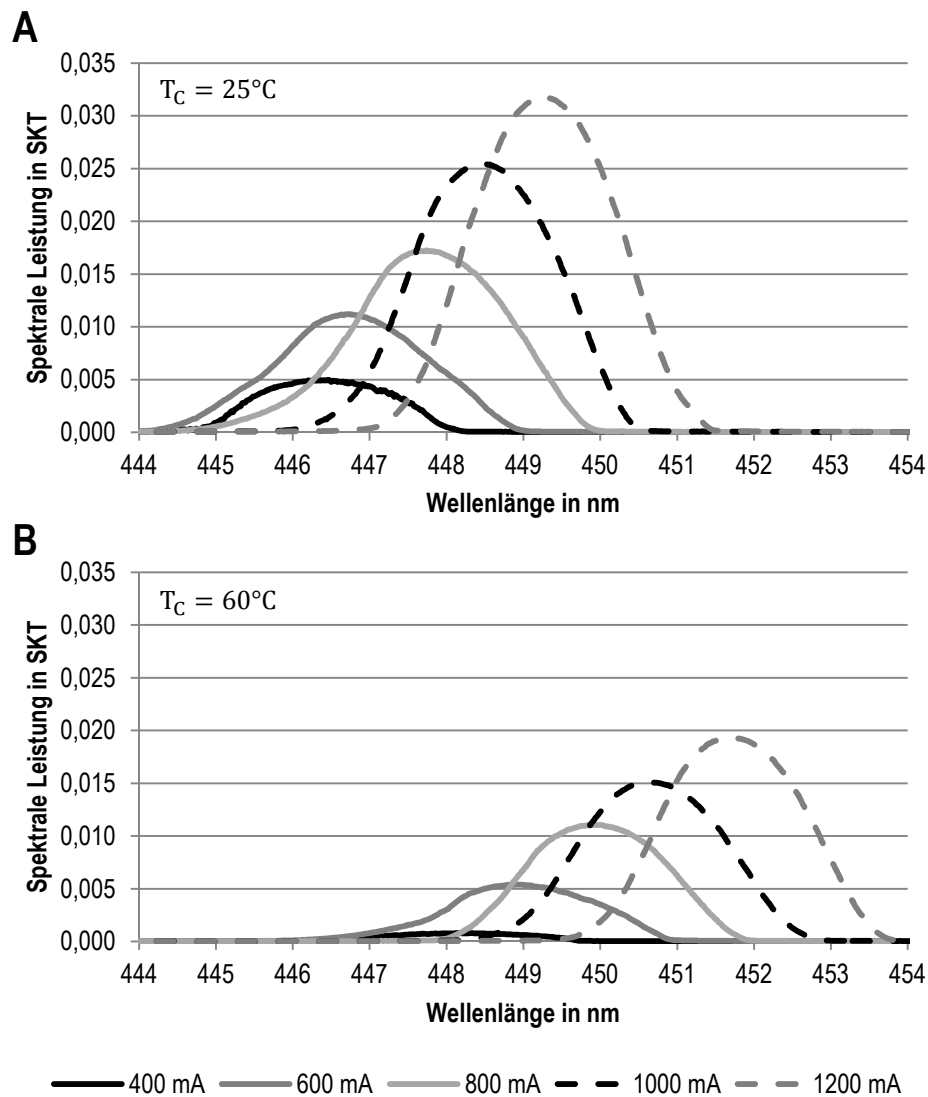


Abbildung 6.2: Abhängigkeit des Diodenspektrums vom Betriebsstrom bei konstanter Gehäuse-temperatur von A) 25°C , B) 60°C

einflusst jedoch den Farbort des vom Leuchtstoff abgestrahlten weißen Lichts, da zumindest der Farbort des nicht konvertierten blauen Lichts dieser Schwankung unterworfen ist.

In einer weiteren Messreihe werden die Auswirkungen von Pulsbetrieb (Sinus- und Rechteckpuls mit Pulsbreite 50 %, Modulationsfrequenzen von 10 kHz bis 100 kHz) auf das Emissionsspektrum der Laserdiode untersucht. Der Mittelwert des Betriebsstroms beträgt jeweils 600 mA, die Gehäuse-temperatur der Diode liegt bei 25°C .

In Abbildung 6.3 ist jeweils die obere und die untere Einhüllende der Messpunkte von zehn Einzelmessungen bei Pulsbetrieb dargestellt. Diese Werte entsprechen näherungsweise den minimalen bzw. maximalen wellenlängenabhängigen Emissionen. Die Modulationstiefe, die der verwendete Diodentreiber (*Thorlabs ITC 4005* mit *TLCMD9*) in der Lage ist zu realisieren, ist die Differenz zwischen den jeweiligen Minimum- und Maximumkurven. Bei einer Modulationsfrequenz von 10 kHz geht der Betriebsstrom unabhängig von der Pulsart zeitweise so

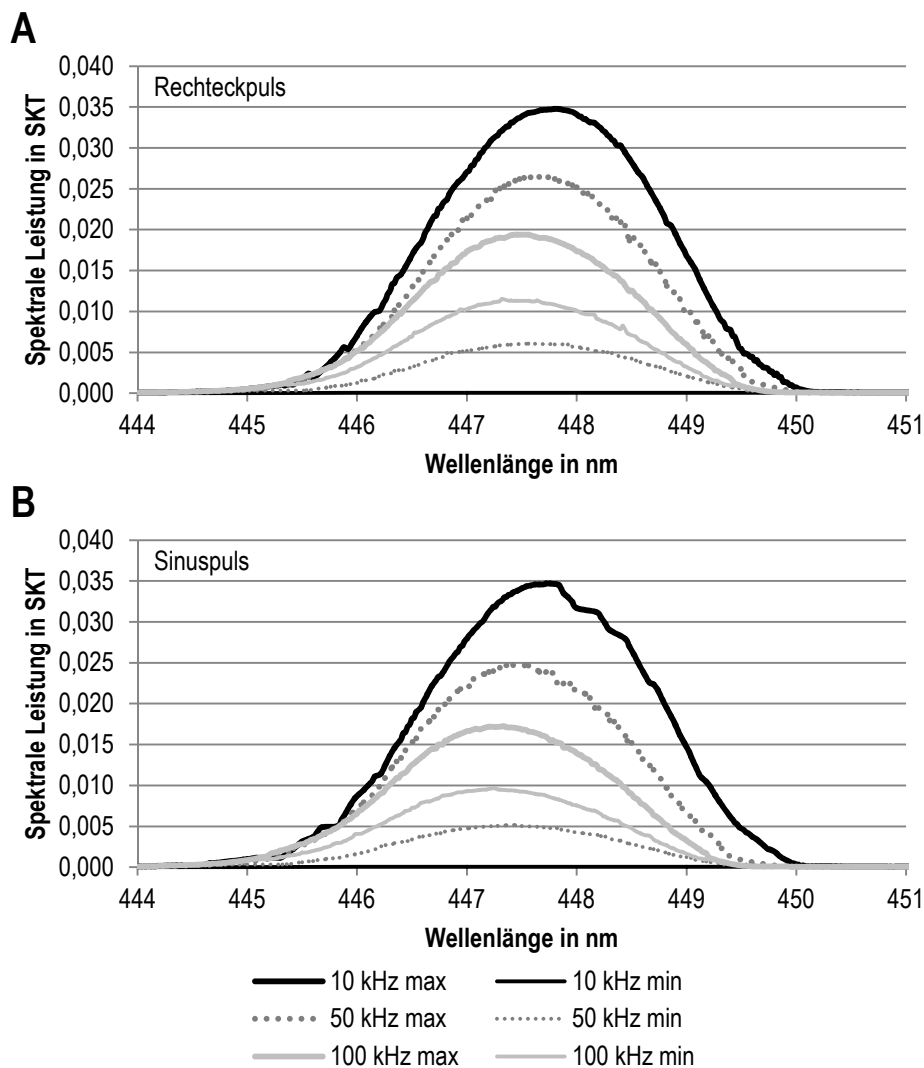


Abbildung 6.3: Abhängigkeit des Diodenspektrums von der Pulsfrequenz, Gehäusetemperatur 25 °C, A) Rechteckpuls, B) Sinuspuls

weit zurück, dass die Diode keine messbare Leistung mehr abgibt. Mit steigender Frequenz nimmt die Modulationstiefe ab, die Minimal- und Maximalkurven nähern sich an. Dementsprechend werden in diesen Fällen weder der vorgegebene Minimal- noch der Maximalwert des Stroms erreicht. Die Peakwellenlänge des Spektrums ist nur geringfügig von der Pulsfrequenz abhängig. Mit steigender Modulationstiefe, was in diesem Fall gleichbedeutend mit einer Abnahme der Pulsfrequenz ist, ist eine leichte, von der Pulsform unabhängige Erhöhung der Emissionswellenlänge festzustellen.

Die Halbwertsbreite des Spektrums ist in den betrachteten Grenzen unabhängig vom Betriebszustand der Laserdiode. Sowohl im cw- als auch im Pulsbetrieb stellt sich eine Spektrenbreite von ungefähr $\lambda_H = 2,3 \text{ nm}$ ein, wobei der Auswertung des Pulsbetriebs die jeweils obere Einhüllende zu Grunde liegt. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle A.3 angegeben. Lediglich bei einer Frequenz von 10 kHz und Sinuspuls sind Abweichungen festzustellen. Wird das über die zehn Einzelmessungen gemittelte Spektrum zur Bestimmung von λ_h herangezogen,

so ergibt sich für diese Parameter ein deutlich geringerer Wert als auf Grundlage der oberen Einhüllenden.

Nach dem Wiener-Chintschin-Theorem kann die Kohärenzlänge l_c eines gauss'sches Spektrums mit der Halbwertsbreite λ_h und der Haupt-Wellenlänge λ bestimmt werden [RADI12]. Es gilt mit $\lambda \approx 450 \text{ nm}$ und $\lambda_h \approx 2,3 \text{ nm}$

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\lambda_h} \approx \frac{(450 \text{ nm})^2}{2,3 \text{ nm}} = 88 \mu\text{m}. \quad (6.5)$$

Da die Breite λ_h des Spektrums unabhängig von dem betrachteten Betriebszustand der Diode ist, ist auch die Kohärenzlänge mit $l_c \approx 88 \mu\text{m}$ konstant.

Wird die Kohärenzlänge als Gangunterschied von zwei Lichtstrahlen überschritten, so nimmt die Intensität des sich ausbildenden Interferenzmusters signifikant ab. Bei Weglängenunterschieden unterhalb der Kohärenzlänge bildet sich ein kontrastreiches Interferenz- beziehungsweise Specklemuster aus. Dabei stellt das Erreichen der Kohärenzlänge keine scharfe Grenze, sondern einen Übergangsbereich dar.

Die Kohärenzlänge der Laserdiode von knapp $0,1 \text{ mm}$ ist groß genug, um bei der Fokussierung mit einer Linse, deren Brennweite wenige Millimeter beträgt, Speckleeffekte auf dem bestrahlten Leuchtstoff hervorzurufen. Diese Specklemuster sind gegebenenfalls als sogenannte Fernfeld-Speckles in der Emission des Leuchtstoffs sichtbar.

In Fahrzeugscheinwerfern hingegen wird das vom Leuchtstoff emittierte Licht durch ein optisches System umgelenkt, dessen Abmessungen die Kohärenzlänge um mindestens zwei Größenordnungen übersteigen. Ein beliebiger Punkt in der erzeugten Lichtverteilung entsteht als Überlagerung einer Vielzahl von Lichtstrahlen, deren Weglängen sich im Regelfall signifikant unterscheiden. Die entstehenden Specklemuster sind deshalb arm an Kontrast, so dass von keiner negativen Beeinflussung des Lichtbildes ausgegangen wird.

6.2 Leuchtstoffe

In diesem Abschnitt werden verschiedene Leuchtstoffe hinsichtlich des Einsatzes in der Kraftfahrzeugtechnik untersucht. In Abschnitt 6.2.1 werden Farbort und Spektrum unterschiedlicher Leuchtstoffe vermessen und mit den gesetzlichen Forderungen für Fahrzeugscheinwerfer abgeglichen. In Abschnitt 6.2.2 ist der Einfluss von Schichtdicke und Dotierung eines Leuchtstoffs Gegenstand der Untersuchungen. Zusätzlich wird die Zeitabhängigkeit der Emission betrachtet. Die weiteren Unterabschnitte befassen sich mit der Größe des lichtemittierenden Punktes auf einem Leuchtstoff und mit dessen winkelabhängiger Abstrahlcharakteristik. In Abschnitt 6.2.5 werden schließlich die Anforderungen an Leuchtstoffe für den Einsatz in Fahrzeugscheinwerfern zusammengefasst.

6.2.1 Farbort und Spektrum reflektiv eingesetzter Leuchtstoffe

Der Farbort einer Scheinwerferlichtquelle muss einer Vielzahl von gesetzlichen Anforderungen genügen. Unter anderem muss sich der Farbort der emittierten Strahlung gemäß der ECE-Regelung 113 innerhalb eines bestimmten Bereichs befinden (vergleiche Abbildung 2.2). Darüber hinaus ist für LED-Scheinwerfer in Regelung 112 ein Mindest-Rotanteil des abgestrahlten Spektrums vorgeschrieben. So muss der ab 610 nm emittierte Lichtstrom mindestens 5% am gesamten Lichtstrom ausmachen, um beispielsweise die Erkennbarkeit von roten Verkehrsschildern sicherzustellen. Bei einem Scheinwerfer wird hierfür jedoch nicht der integral gemessene Lichtstrom bewertet, sondern nur der Teil, der in Richtung des genormten Punktes $50V$ emittiert wird.

Obwohl die ECE-Regelung 112 im engeren Sinn nur für LED-basierte Scheinwerfer gedacht ist, wird sie im Rahmen dieser Arbeit zur Bewertung des Rotanteils der Laserlichtquelle angewandt. Eine Messung im Punkt $50V$ ist allerdings für eine Lichtquelle ohne Scheinwerfer nicht möglich. Stattdessen wird die über alle Abstrahlraumwinkel integrierte Strahlungsemission bewertet. Der so bestimmte Farbort wird vom optischen Scheinwerfersystem auf den für die Zulassung des Scheinwerfers relevanten Punkt $50V$ übertragen. Bedingt durch chromatische Effekte im Scheinwerfer beziehungsweise eine Winkelabhängigkeit der von der Lichtquelle abgestrahlten Lichtfarbe, wie in Abschnitt 6.2.4 betrachtet, kann der Farbort im betrachteten Punkt dabei jedoch durch das optische System verfälscht werden.

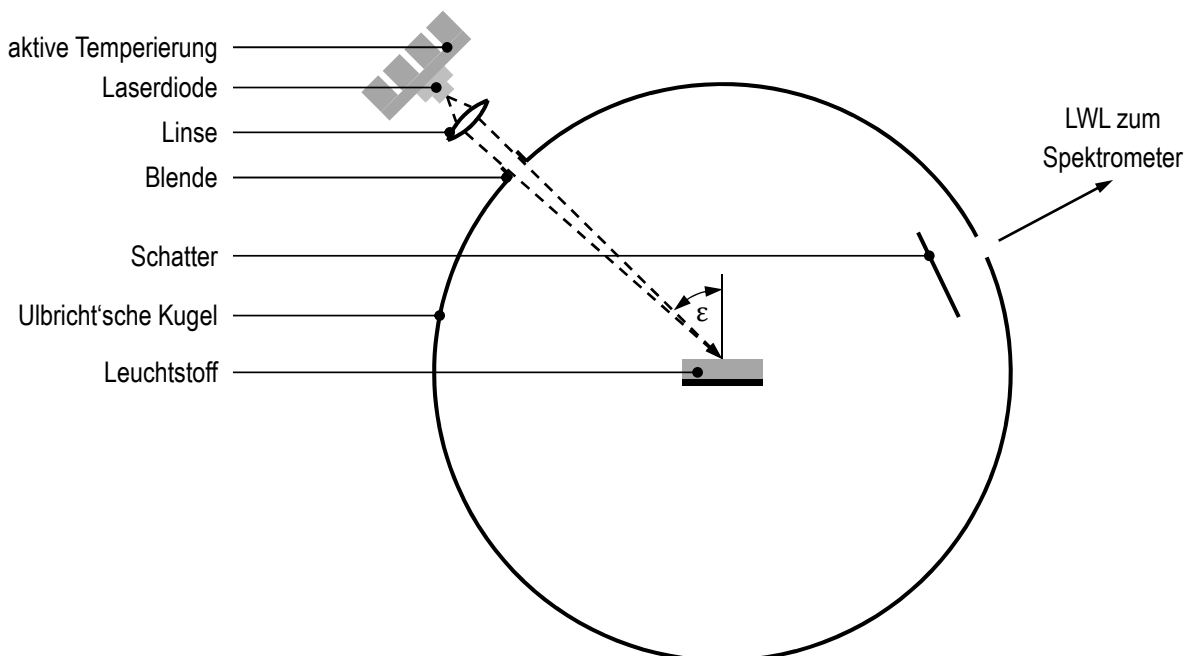


Abbildung 6.4: Versuchsaufbau zur integralen Vermessung reflektiv eingesetzter Leuchtstoffe

Die Vermessung der Spektren erfolgt mit Hilfe einer Ulbricht'schen Kugel (*Labsphere TOCS 20''*), an die über einen Lichtwellenleiter ein Spektrometer (*Ocean Optics USB2000*) angeschlossen ist. Diese wird in 4π -Konfiguration eingesetzt, so dass sich der Leuchtstoff als Lichtquelle im Inneren der Integrationskugel befindet (Abbildung 6.4). Durch die matte, hoch-

reflektive Bariumsulfat-Beschichtung der Kugelninnenseite wird das emittierte Licht vielfach reflektiert, bevor es in die optische Faser eingekoppelt wird, welche die Kugel mit dem Spektrometer verbindet. Ein Schatter verhindert, dass von der Lichtquelle abgestrahltes Licht auf den Lichtwellenleiter trifft, ohne zuvor von der Kugeloberfläche umgelenkt worden zu sein. Über eine zusätzliche Korrekturmessung wird der spektrale Absorptionsgrad des Versuchsaufbaus im Vergleich zum Kalibrieresetup der Kugel bestimmt und bei der Vermessung des Leuchtstoffs korrigiert.

Die Laserdiode (*Osram PL-TB450B*), die den in der Kugel befindlichen Leuchtstoff anregt, wird aktiv temperiert und außerhalb der Messeinrichtung positioniert. Über eine Linse wird die optische Strahlung mit einer Leistung von etwa $1,3\text{ W}$ auf den Leuchtstoff fokussiert, wobei eine an der Eintrittsöffnung der Kugel befindliche Blende das Streulicht der Diode absorbiert. Die Laserstrahlung trifft den Leuchtstoff unter einem Winkel ε von etwa 55° . Mit diesem Versuchsaufbau kann alles von dem reflektiv eingesetzten Leuchtstoff abgestrahlte Licht erfasst werden, einschließlich des an der Oberfläche des Konverters und am Trägermaterial reflektierten Laserlichts. Diese direkte Reflexion nicht konvertierten Lichts muss bei der Entwicklung von Laserscheinwerfern berücksichtigt werden, da sie eine lokale Änderung des Farborts einer Lichtverteilung bewirkt. Wie sich diese Reflexion in der Praxis auswirkt wird anhand von Muster II in Abschnitt 6.4.4 betrachtet.

Im Rahmen dieser Untersuchung stehen verschiedene Leuchtstoffe der Firma Intematix zur Verfügung. Teilweise handelt es sich dabei um Entwicklungsmuster. Die Proben *EY4156*, *EY4453*, *NYAG4156-L* und *NYAG4355-L* liegen in Pulverform vor und werden für die Messung mit Wärmeleitpaste auf einer reflektierenden Aluminiumplatte fixiert. Die Proben *CL-750-LR* und *CL-840-LR* sind in ein transparentes Polymer eingebettet und auf Glasträger aufgebracht. Da die Leuchtstoffe teilweise für transmissive Nutzung und für Anregung mit LEDs gedacht sind, weichen die in Tabelle 6.1 dargestellten Messergebnisse von den Herstellerangaben ab. Zum Vergleich wird eine herkömmliche LED (*Osram Duris E5*), die ebenfalls mit einem Leuchtstoff in Polymermatrix beschichtet ist, mit dem Laser bestrahlt und als reflektiver Leuchtstoff eingesetzt. Der Halbleiterchip der LED selbst wird nicht aktiviert. Zum Vergleich ist in Tabelle 6.1 auch der Farbort eines HID-Xenonscheinwerfers angegeben. Bedingt durch den abweichenden Messaufbau kann jedoch kein Lichtstrom des Scheinwerfers angegeben werden.

Bei einigen Leuchtstoffen tritt sichtbares Thermal Quenching auf, bei anderen ist sogar eine irreparable thermische Schädigung festzustellen.

Die Laserdiode wird für die in Tabelle 6.1 angegebenen Messungen auf eine Gehäusetemperatur von 25°C temperiert (vergleiche [LACH14c]). Zum Vergleich sind die bei der geringeren Temperatur von $T_C = 15^\circ\text{C}$ durchgeführten Messungen der Proben *CL-750-LR* und *CL-840-LR* ebenfalls mit aufgeführt (vergleiche [BASU13]). Die reduzierte Temperatur führt dabei zu einer geringfügig höheren Strahlungsleistung der Diode, wodurch sich der vom Leuchtstoff abgegebene Lichtstrom ebenfalls erhöht, sofern kein Thermal Quenching auftritt. Die Leuchtstoffe selbst werden nicht temperiert.

Tabelle 6.1: Lichtstrom und Farbwerte verschiedener Leuchtstoffe beziehungsweise Lichtquellen nach [LACH14c]

Leuchtstoff / Lichtquelle	Lichtstrom in lm	Farbtemperatur in K	R_a	Rotanteil in %
EY4156	159,7	7184	54,73	5,0
EY4453	204,8	5414	55,78	7,3
NYAG4156-L	303,8	5746	59,34	6,3
NYAG4355-L	226,0	5304	60,12	7,5
CL-750-LR	343,0	6349	70,31	9,5
CL-840-LR	324,8	4629	75,10	11,1
Osram Duris E5 (LED)	103,5	5605	82,20	12,6
Xenon HID	-	4116	64,51	8,1

Einen hohen Lichtstrom emittieren vor allem die Proben *NYAG4156-L*, *CL-750-LR* und *CL-840-LR*. Letztere weisen außerdem einen hohen Farbwiedergabeindex auf. Der Rotanteil aller gemessenen Leuchtstoffe liegt im von der ECE geforderten Bereich beziehungsweise bei *EY4156* an dessen Grenze. Der Rotanteil der Probe *CL-840-LR* und der angestrahlten LED ist besonders hoch, da beide für eine gute Farbwiedergabe ausgelegt sind. Der Rotanteil der übrigen Proben ist mit dem des konventionellen Xenonscheinwerfers vergleichbar. Dessen Farbtemperatur beträgt 4116 K , die Farbtemperatur der Leuchtstoffe liegt ausnahmslos darüber.

Wie Abbildung 6.5 zu entnehmen ist emittieren nicht alle Lichtquellen bei den gewählten Umgebungsbedingungen ECE-konformes weißes Licht. Die Farborte der Leuchtstoffe *EY4156*, *NYAG4156-L* und *NYAG4355-L* liegen deutlich außerhalb des geforderten Bereichs. In einem nächsten Schritt wird die Temperaturabhängigkeit des Farborts betrachtet, da die weiße Laserlichtquelle bei einer Vielzahl von Umgebungsbedingungen ECE-konformes Weiß emittieren muss. Dazu wird die Gehäusetemperatur der Laserdiode zwischen 25 °C und 50 °C variiert. Diese Temperaturspanne deckt zwar nicht den gesamten zu berücksichtigenden Bereich ab, liefert aber dennoch wertvolle Ergebnisse zur Charakterisierung der Leuchtstoffe.

Mit Erhöhung ihrer Temperatur emittiert die Laserdiode weniger Strahlung, was zu einer Abnahme der Bestrahlungsstärke des Leuchtstoffs führt. Die Folge ist eine Abnahme der Leuchtstofftemperatur und somit aufgrund des reduzierten Quenchingeffekts eine Verringerung des Blauanteils der emittierten Strahlung. Gleichzeitig stehen mehr nicht angeregte Aktivatorionen im Leuchtstoff zur Verfügung, was zu vermehrter Selbstabsorption und somit zu einer Abnahme der Emission um 500 nm führen kann (vergleiche Abbildung 4.4).

Die Abnahme der Leuchtstofftemperatur hingegen verringert das Thermal Quenching und erhöht den Anteil konvertierter Strahlung. Diese teilweise entgegengesetzt wirkenden Effekte beeinflussen die vom Leuchtstoff emittierte Lichtfarbe in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen. In Abbildung 6.6 sind die Farborte einiger der zuvor charakterisierten Leuchtstoffe bei Variation von Gehäusetemperatur und Betriebsstrom der Laserdiode dargestellt. Die Dioden-

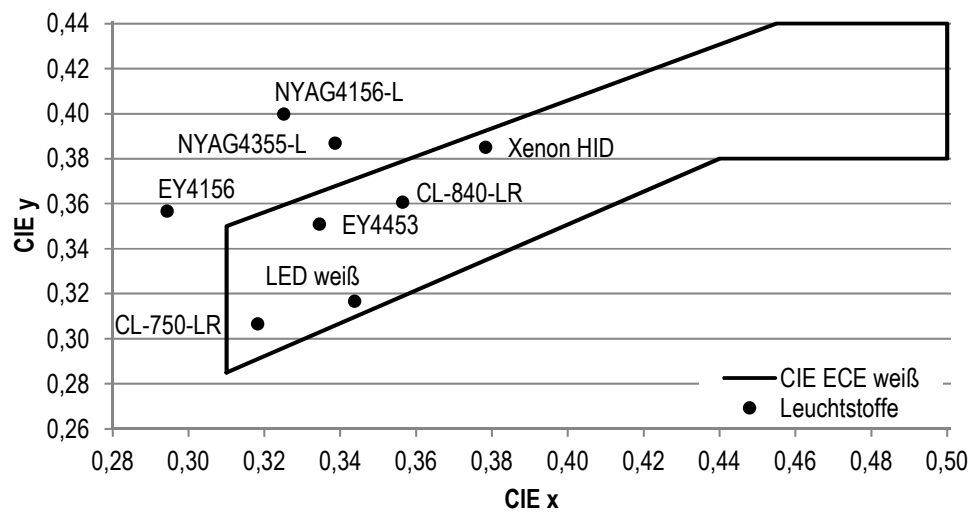


Abbildung 6.5: Farborte der in Tabelle 6.1 dargestellten Lichtquellen im Vergleich zum ECE-Weißraum nach [LACH14c]

temperatur liegt im Bereich zwischen 25°C und 50°C , der Strom wird zwischen 400 mA und 1200 mA variiert.

Der Einfluss von Betriebsstrom und Diodentemperatur auf die erzeugte Farbtemperatur ist so groß, dass er leicht als störend wahrgenommen werden kann. Zudem emittieren nicht alle betrachteten Leuchtstoffe bei allen Betriebsparametern eine ECE-konforme Lichtfarbe. Die Probe *CL-840-LR* strahlt bei allen untersuchten Zuständen normgerechtes Licht ab, bei dem Leuchtstoff *EY4453* müssen einige wenige Kombinationen aus Betriebsstrom und Temperatur vermieden werden. Der Farbort der angestrahlten LED liegt größtenteils und der des wirkungsgradstarken Leuchtstoffs *NYAG4156-L* immer außerhalb des zugelassenen Bereichs.

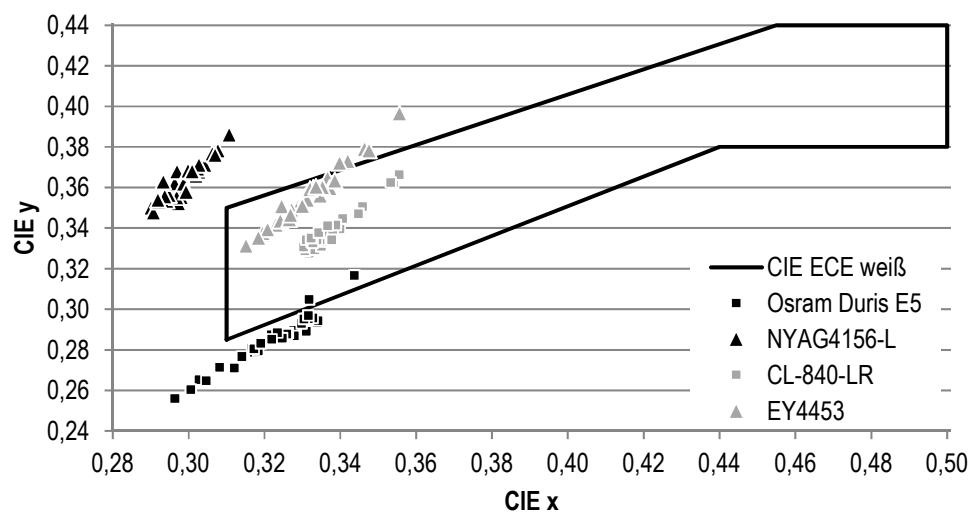


Abbildung 6.6: Farborte einiger Leuchtstoffe bei veränderten Diodenparametern nach [LACH14c]

Mit folgenden Optionen kann die Schwankung des Farborts reduziert werden:

- Temperaturregelung von Leuchtstoff und Laserdiode.
- Verbesserung der thermischen Anbindung des Leuchtstoffs. Hierzu muss der Leuchtstoff auf einen Körper mit nahezu konstanter Oberflächentemperatur aufgebracht werden, was im Fahrzeugumfeld schwierig ist.
- Einsatz eines Leuchtstoffs, der eine höhere Quenchingtemperatur aufweist.
- Einsatz von keramischen Leuchtstoffen, welche über eine höhere Wärmeleitfähigkeit verfügen als die hier betrachteten, in eine Polymermatrix eingebundenen Konverter.

6.2.2 Einfluss von Schichtstärke und Dotierung

In diesem Abschnitt wird die Emission eines Leuchtstoffs in Abhängigkeit von dessen Schichtdicke und der Aktivorenkonzentration untersucht, wozu der in Abbildung 6.7 skizzierte Versuchsaufbau genutzt wird. In einem zweiteiligen, verschraubten Aluminiumgehäuse befindet sich eine Laserdiode vom Typ *Osram PL-TB450B*, deren Strahlung mit einer Linse auf den transmissiv eingesetzten Leuchtstoff fokussiert wird. Die Laserdiode selbst wird nicht temperiert, ist jedoch wärmeleitend mit dem mit Kühlrippen versehenen Gehäuse verbunden. Der auf Saphirglas aufgebrachte Leuchtstoff wird mit einem Aluminiumniederhalter fixiert und ebenfalls über das Gehäuse gekühlt.

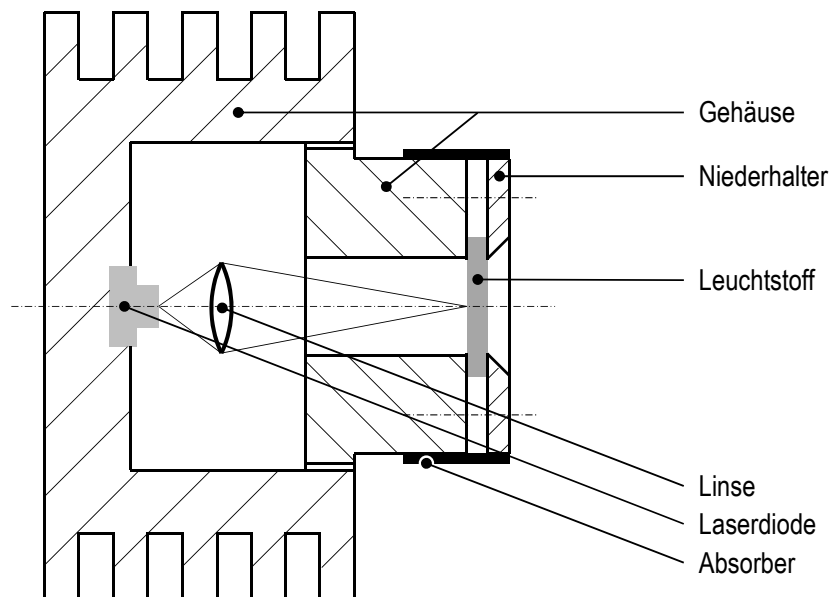


Abbildung 6.7: Versuchsaufbau zur Vermessung transmissiv eingesetzter Leuchtstoffe, Skizze

Die mit dem Leuchtstoff *Tailorlux TL-0036* [TAIL12] beschichtete Seite des Trägerglases befindet sich auf der nach außen gewandten Seite des Versuchsaufbaus, so dass möglichst wenig emittierte Strahlung durch den Niederhalter absorbiert wird. Dabei wird in Kauf genommen, dass ein Teil des Laserlichts von der Rückseite des Saphirglases durch Fresnelreflexion zurückgeworfen wird, ohne den Leuchtstoff zu erreichen. Die fokussierte optische Leistung der

Tabelle 6.2: Leuchtstoff Tailorlux TL-0036, transmissiv auf Saphirglas

Probe	0	A	B	C	D
Cer-Konzentration in $mol\%$	2,0	2,5	2,5	3,0	3,0
Schichtdicke Leuchtstoff in g/m^2	60	70	120	100	150
Lichtstrom in lm	62,0	57,3	44,5	44,3	18,9
Optische Leistung in mW_{opt}	177,3	150,0	106,2	105,6	43,4
Farbwiedergabeindex R_a	68,7	67,3	60,2	58,8	36,1
Farbort CIE x	0,314	0,326	0,386	0,431	0,479
Farbort CIE y	0,334	0,345	0,444	0,493	0,514
Farbtemperatur in K	6420	5760	-	-	-
Abweichung vom Planck'schen Strahler Δuv in %	0,56	0,47	2,70	3,36	3,23
Rotanteil in %	7,8	8,3	8,8	9,8	11,1
LER in lm/W_{opt}	349,7	382,0	419,0	419,5	435,5
LER_{max} in lm/W_{opt}	371,6	382,9	-	-	-
LER/LER_{max}	0,941	0,998	-	-	-

Laserdiode beträgt etwa 1,2 W. Der gesamte Versuchsaufbau ist lichtdicht, so dass einzig die vom Leuchtstoff emittierte Strahlung in einer Ulbricht'schen Kugel in 4π -Konfiguration erfasst wird.

Um reproduzierbare Versuchsbedingungen einzustellen, findet jede Messung 30 Sekunden nach dem Einschalten der Laserdiode statt. In Tabelle 6.2 sind die entsprechenden Messergebnisse für unterschiedliche Schichtstärken des Leuchtstoffs dargestellt, wobei auch die Konzentration des Aktivators (Cer-Konzentration) variiert wird. Der gewählte Messzeitpunkt liegt vor dem Erreichen des thermischen Gleichgewichts zwischen Laserdiode, Leuchtstoff und Umgebung. In Abbildung 6.11 ist die zeitabhängige Lichtemission einer der Leuchtstoffproben dargestellt.

Untersucht werden fünf Leuchtstoffproben, die sich in Cer-Konzentration und Schichtstärke unterscheiden. Zur Verfügung steht eine Probe mit 2,0% Cer und je zwei Proben mit 2,5% bzw. 3,0% des Aktivators. Die Schichtstärken des auf Saphirglas aufgetragenen YAG:Ce-Leuchtstoffs Tailorlux TL-0036 betragen laut Hersteller 60 ... 150 g/m^2 , wobei prozessbedingt vorhandene Rückstände von Lösungsmitteln dieses Ergebnis beeinträchtigen können.

Erwartungsgemäß ist die Emission des transmissiv eingesetzten Leuchtstoffs sowohl von dessen Schichtstärke als auch von der Anreicherung mit Cer als Aktivator abhängig. Sowohl mit steigender Schichtdicke als auch mit zunehmender Cer-Konzentration nimmt der Anteil nicht konvertierten Laserlichts an der Emission ab (Tabelle 6.2). Gleichzeitig geht sowohl die emittierte optische Leistung als auch der Lichtstrom im betrachteten Fall zurück. Der bei diesem Setup emittierte Lichtstrom Φ lässt sich mit der Approximation

$$\frac{\Phi}{lm} = 64,803 - 2,2704 \left(\frac{s}{g/m^2} \cdot \frac{c_{Ce}}{1} \right)^2 \quad (6.6)$$

gut annähern, wobei s für die Schichtdicke des Leuchtstoffs und c_{Ce} für die Konzentration des Aktivators (Cer) steht. Das Bestimmtheitsmaß dieser Approximation beträgt 0,9995. Der Anteil umgewandelten Lichts steigt mit diesen beiden Parametern Cer-Konzentration und Schichtdicke an. Das Produkt aus beiden Größen, multipliziert mit der Fläche A des Leuchtstoffs ist ein Maß für die Menge an Aktivator-Ionen im Konverter und somit eine Kenngröße für die Konversionsrate.

Zu erwarten ist, dass mit steigender Menge an Aktivator-Ionen der vom Leuchtstoff abgestrahlte Lichtstrom steigt, da das konvertierte Licht gemäß der $V(\lambda)$ -Kurve deutlich heller wahrgenommen wird als das blaue Laserlicht. In der Realität nimmt jedoch der Lichtstrom von der am geringsten dotierte Probe 0 bis zur Probe D, welche die größte Menge des Aktivators enthält, kontinuierlich ab. Ursache hierfür sind Verluste im Leuchtstoff, welche zusätzlich zu den systembedingten Verlusten des Stokes Shift auftreten und die Lichtausbeute reduzieren.

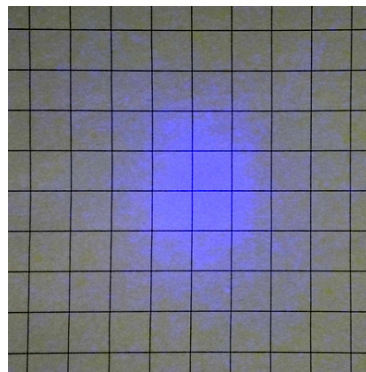


Abbildung 6.8: Foto der Emission von Leuchtstoffprobe „0“ im Fernfeld

Die Probe 0, deren Schichtdicke sehr gering ist, strahlt sehr ungleichmäßig ab. Abbildung 6.8 zeigt ein Foto der Emission dieses Leuchtstoffs im Fernfeld. Zur besseren Erkennbarkeit der Farbunterschiede sind die Kontraste in der Darstellung verstärkt. Der zentrale Bereich erscheint dem menschlichen Auge rein blau, hier durchdringt ein Teil des nicht umgewandelten Laserlichts die Leuchtstoffprobe, ohne zuvor gestreut zu werden. Auch außerhalb dieses Bereichs lassen sich feine, blaue Strukturen erkennen, wobei es sich vermutlich um Fernfeld-Speckles handelt [BRIE93]. Die erzeugten Muster verändern sich, wenn die auf dem Leuchtstoff angestrahlte Position variiert wird.

Die Schichtstärke des Leuchtstoffs von Probe A scheint ungleichmäßig zu sein, so dass die Messergebnisse vom bestrahlten Punkt auf der Leuchtstoffoberfläche abhängen. Die in Tabelle 6.2 angegebenen Ergebnisse dieser Probe sind folglich mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Eine Farbtemperatur kann für alle Farborte bestimmt werden, deren Abstand zur Planck'schen Kurve Δuv im uv -Farbraum kleiner ist als 0,05 [ROTS15]. Diese Grenze erscheint im Zusammenhang der Weißlichterzeugung als zu weit gefasst. Stattdessen wird eine Obergrenze von

$\Delta uv = 0,02$ definiert. Für die Proben 0 und A kann dementsprechend eine Farbtemperatur bestimmt werden. Die Farborte der restlichen Proben hingegen weisen einen zu großen Abstand von der Planck'schen Kurve auf. Sie emittieren zudem kein ECE-konformes Weiß (vergleiche Abbildung 6.9).

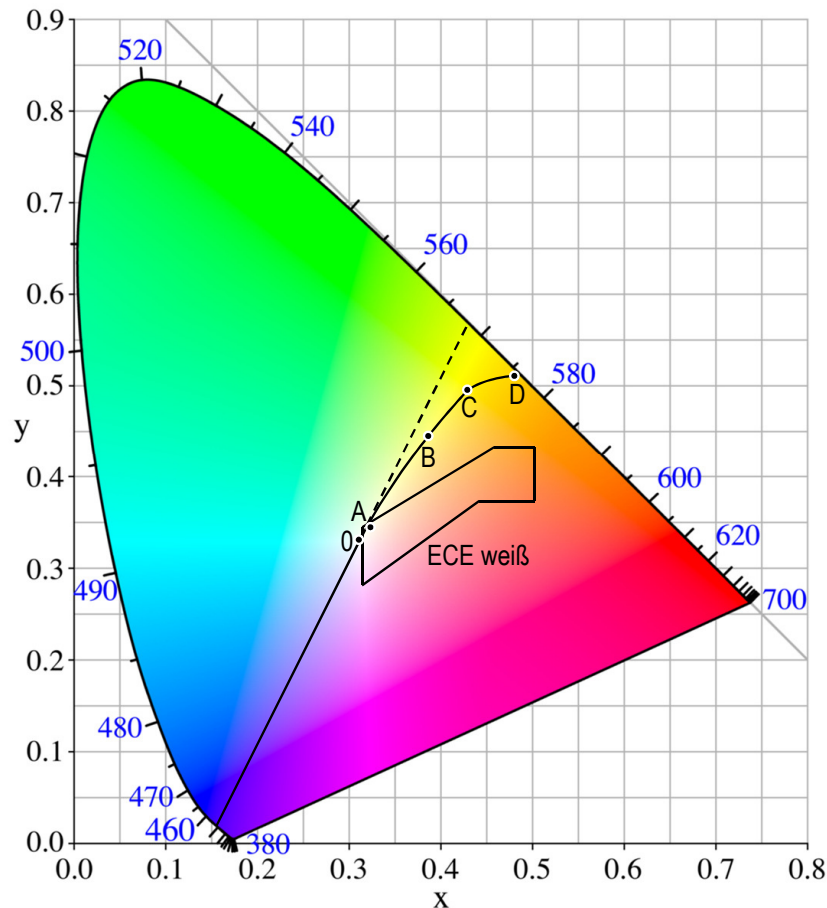


Abbildung 6.9: Farborte der transmissiv eingesetzten Leuchtstoffproben im Vergleich zum ECE-Weißraum, [WOLF16c]

Neben der Farbtemperatur und der Entfernung von der Planck'schen Kurve ist in Tabelle 6.2 die Lichtausbeute LER der Leuchtstoffproben angegeben, welche das Verhältnis aus abgegebenem Lichtstrom und emittierter optischer Leistung darstellt. Außerdem wird die maximal mögliche Lichtausbeute LER_{max} durch lineare Interpolation der von Hung und Tsao angegebenen Werte bestimmt [HUNG13]. Dieser Wert stellt die theoretische Obergrenze der Lichtausbeute für Weißlichtquellen in Abhängigkeit von Farbtemperatur und Farbwiedergabeindex dar.

Die maximale Lichtausbeute lässt sich nur für die Proben 0 und A bestimmen, da nur diese Leuchtstoffe nahe genug an der Kurve der Temperaturstrahler liegen. Das Verhältnis aus LER und LER_{max} gibt an, wie gut das Spektrum einer Lichtquelle geeignet ist, um weißes Licht mit einem guten Wirkungsgrad zu erzeugen. Es beträgt für Probe 0 0,941 und für Leuchtstoff A 0,998. Vor allem die Probe A emittiert ein Spektrum, das sich nahezu ideal für eine effiziente Weißlichterzeugung eignet. Der hohe Wirkungsgrad dieses Spektrums ist auch damit begründet, dass sich der Farbort der Probe durch einen geringfügig erhöhten Grünanteil etwas

oberhalb der Planck'schen Kurve befindet. Da das menschliche Auge gemäß $V(\lambda)$ für diesen Spektralbereich besonders empfindlich ist, ist der Wirkungsgrad der Probe A besonders hoch.

Häufig wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich der Farbort einer leuchtstoffbasierten Lichtquelle auf einer Geraden einstellen lässt, die den Farbort der anregenden Lichtquelle mit dem des Leuchtstoffs verbindet. In der Praxis ist diese Annahme nicht immer hinreichend exakt.

In Abbildung 6.9 sind die Farborte der untersuchten Leuchtstoffproben dargestellt. Eine Gerade verbindet den Farbort der Laserdiode mit dem der am geringsten dotierten Leuchtstoffprobe 0. Obwohl alle weiteren Proben lediglich abweichende Schichtstärken und Aktivatorkonzentrationen aufweisen, weichen die von ihnen abgestrahlten Farborte teilweise deutlich von der Geraden ab und befinden sich auf einer Kurve. Je größer der Anteil der vom Leuchtstoff umgewandelten Strahlung ist, desto höher ist dabei der Rotanteil des emittierten Spektrums (vergleiche auch Tabelle 6.2). Ein Grund hierfür ist die Selbstabsorption des Leuchtstoffs, die mit steigender Cer-Konzentration ebenso zunimmt wie mit einer Erhöhung der Schichtstärke.

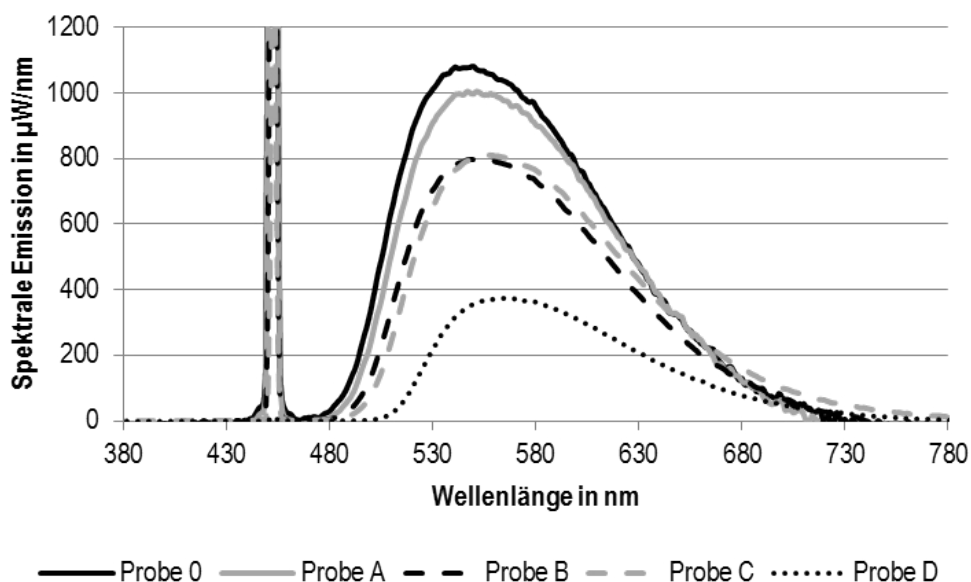


Abbildung 6.10: Spektren der transmissiven Leuchtstoffproben

Je höher die Konzentration des Aktivators im YAG-Kristall und je größer dessen Schichtdicke ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass ein mit der Wellenlänge $\lambda_S \approx 500 \text{ nm}$ emittiertes Photon auf ein nicht angeregtes Cer-Ion trifft und von diesem absorbiert wird anstatt den Kristall als sichtbares Licht zu verlassen. Die Strahlung, die der Leuchtstoff in Folge dieser Photonenabsorption emittiert, hat eine größere Wellenlänge als λ_S . Als Folge emittiert der Leuchtstoff mit zunehmender Schichtstärke und Aktivatorkonzentration weniger Strahlung im Bereich der Selbstabsorption, wobei bei YAG:Ce $\lambda_S \approx 500 \text{ nm}$ gilt. Die Folge ist ein steigender Anteil an Strahlung mit höherer Wellenlänge, wodurch eine Rotverschiebung der Emission eintritt.

In Abbildung 6.10 sind die Spektren der fünf Leuchtstoffproben jeweils 30 Sekunden nach Einschalten der Laserdiode dargestellt. Deutlich sichtbar ist die Abnahme des Lichtstroms mit

steigender Schichtdicke und Dotierung. Die Lücke im Spektrum zwischen der Emission der Laserdiode bei $\lambda \approx 450 \text{ nm}$ und der des Leuchtstoffs kennzeichnet den Bereich der Selbstabsorption und wird parallel dazu größer. Vor allem Probe D zeigt eine breite Emissionslücke zwischen 460 nm und 500 nm , was zu der beschriebenen Rotverschiebung des Farborts führt. Zusätzlich absorbiert oder konvertiert diese Probe nahezu das gesamte anregende Licht, so dass sich der Farbort dieses Leuchtstoffs am rechten Rand des CIE-Normfarbraums in Abbildung 6.9 befindet.

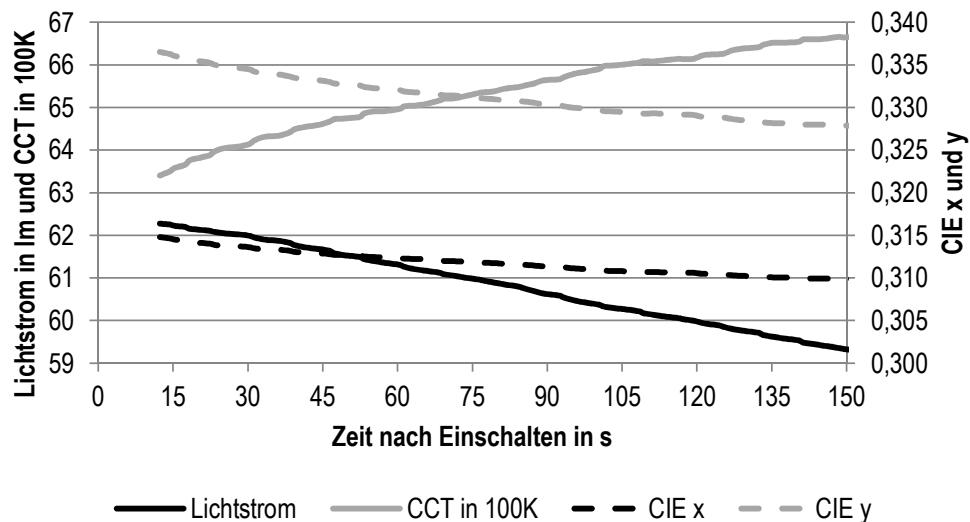


Abbildung 6.11: Zeitabhängige Emission der Leuchtstoffprobe „0“

In Abbildung 6.11 ist der zeitliche Verlauf der Emission der Leuchtstoffprobe 0 dargestellt. Der zuvor betrachtete Zeitpunkt $t = 30 \text{ s}$ ist ein Element dieser Messreihe, bei der eine gleitende Mittelwertbildung zum Reduzieren der Messabweichungen eingesetzt wird.

Bedingt durch die Integrationszeit des Spektrometers und die Mittelwertbildung kann der erste Messwert erst etwa 12 s nach Einschalten der Laserdiode angegeben werden. Im betrachteten Intervall zwischen diesem Zeitpunkt und $t = 150 \text{ s}$ fällt der Lichtstrom von $62,3 \text{ lm}$ auf $59,3 \text{ lm}$. Die CIE-x- und -y-Koordinaten nehmen um $0,05$ beziehungsweise $0,09$ ab, was sich in der Zunahme der Farbtemperatur von 6340 K auf 6660 K widerspiegelt.

Dieser instationäre Verlauf der Messgrößen Lichtstrom, Farbtemperatur und Farbort lässt sich mit dem thermischen Verhalten des Versuchsaufbaus erklären. Sowohl die Temperatur der Laserdiode als auch die des Leuchtstoffs steigt mit der Zeit an, was an dem begrenzten Wirkungsgrad der Diode und dem Stokes Shift sowie weiteren Verlustmechanismen im Leuchtstoff liegt. Durch die steigende Diodentemperatur nimmt die abgestrahlte Laserleistung mit der Zeit ab (vergleiche Abschnitt 6.1.1). Die steigende Farbtemperatur der Emission lässt sich mit einsetzendem Thermal Quenching des Leuchtstoffs erklären. Der Leuchtstoff, der zwischen zwei Aluminiumkörpern ohne Wärmeleitpaste fixiert ist, kann nicht genug Wärme abführen und erhitzt sich zumindest lokal am Ort der höchsten Bestrahlungsstärke so stark, dass zunehmend weniger eingestrahlichtes Licht konvertiert wird. In Folge dessen steigt die Farbtemperatur und die Werte der CIE-x- und -y-Farbkoordinaten nehmen ab. In Summe sinkt der vom Leucht-

stoff abgestrahlte Lichtstrom, da einerseits mit der Zeit weniger Laserlicht auf den Leuchtstoff trifft und andererseits der Anteil umgewandelten Lichts, welches im physiologisch günstigen Spektralbereich liegt, ebenfalls abnimmt.

6.2.3 Lokale Emission

Die Strahlung, welche an der Anregungsseite auf einen Leuchtstoff trifft, wird in Abhängigkeit von der Kristallstruktur und von gegebenenfalls vorhandenen Streupartikeln im Volumen des Konvertermaterials gestreut. Folglich ist die Energiedichte direkt an der bestrahlten Stelle der Oberfläche am größten und nimmt entlang der Weglänge, welche die Strahlung im Material zurücklegt, ab.

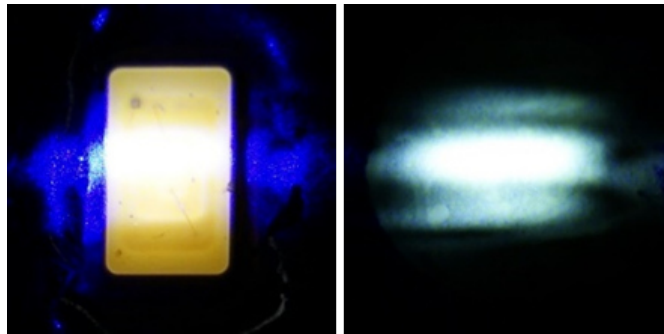


Abbildung 6.12: Abstrahlverhalten von Leuchtstoffen, links Leuchtstoff eingebettet in Polymer (LED), rechts Leuchtstoff (NYAG) ohne Matrix, [LACH14c]

In Abbildung 6.12 sind zwei unterschiedliche Leuchtstoffe dargestellt, welche mit der selben Laserdiode bestrahlt werden. Mit Hilfe einer Linse wird das Licht der Diode auf eine vergleichsweise große Fläche auf den Leuchtstoffen gelenkt. Im rechten Bildteil ist ein pulverförmiger Leuchtstoff dargestellt. Die angeregte Fläche ist deutlich zu erkennen, da die anregende Strahlung nur in vernachlässigbaren Teilen von einem Pulverkorn zu einem anderen gelangen kann. Auch die konvertierte Strahlung kann nur geringe Weglängen im Leuchtstoff zurücklegen.

Im linken Teil der Abbildung ist mit gleichem Maßstab und gleichen Kameraeinstellungen die Bestrahlung einer weißen LED gezeigt, bei welcher der Leuchtstoff in eine Polymermatrix eingebettet ist. Die Fokussierung der Laserdiode ist ebenfalls unverändert. Die Anregungsstrahlung kann sich innerhalb des Leuchtstoffs ausbreiten, so dass das Material großflächig zur Emission angeregt wird. Auch die konvertierte Strahlung kann, wie in Abbildung 4.6 gezeigt, durch den Leuchtstoff propagieren, bevor sie aus dem Material ausgekoppelt wird. Dadurch leuchtet ein großer Bereich der Leuchtstoffoberfläche, die Konturen der Anregungsstrahlung sind kaum zu erkennen. Um eine Lichtquelle mit einer kleinen Étendue zu erhalten, sollte die Vergrößerung der Lichtemissionsfläche möglichst vermieden werden (vergleiche Abschnitt 4.4.1). Auf der anderen Seite ist bei einem pulverförmigen Leuchtstoff die Gefahr des Thermal Quenchings durch die geringe Wärmeleitfähigkeit gegenüber einer gesinterten Keramik oder einem Einkristall deutlich erhöht.

Ashdown schlägt den Einsatz eines Diffusors im Strahlengang des Lasers vor, um die lokale Energiedichte auf dem Leuchtstoff zu reduzieren [ASHD09]. Auf diese Weise kann die Gefahr eines einsetzenden Thermal Quenchings reduziert werden, auch ohne die auf dem Konverter angeregte Fläche signifikant zu vergrößern.

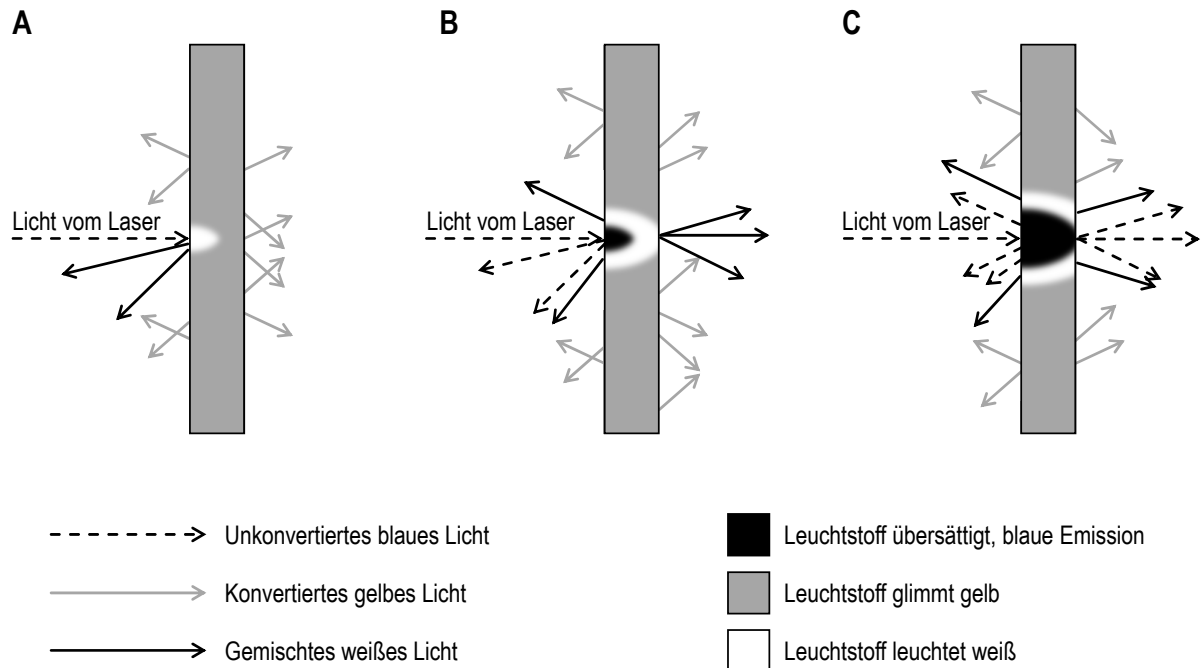


Abbildung 6.13: Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Emission eines Leuchtstoffs nach [WOLF16a],

A) geeignet für reflektiven Einsatz, B) geeignet für transmissiven Einsatz, C) zu hohe Leistungsdichte des Lasers

In Abbildung 6.13 ist ein Leuchtstoff dargestellt, bei dem sich, wie in Abbildung 6.12 im linken Teil gezeigt, die Photonen im Konvertermaterial ausbreiten können. Soll der Leuchtstoff reflektiv eingesetzt werden, so muss die Energiedichte auf der Anregungsseite so gewählt werden, dass der Farbort der Lichtemission nicht durch einsetzendes Quenching unzulässig verschoben wird (Abbildung 6.13 A). Bedingt durch Korngrenzen oder Streupartikel im Konvertermaterial werden jedoch weite Bereiche des Leuchtstoffs zur Lichtemission angeregt. Da die Weglängen, welche die dabei Photonen im Material zurücklegen, verhältnismäßig groß sind, ist die Wahrscheinlichkeit einer Konversion ebenfalls hoch. Die Folge ist, dass ein Bereich des Leuchtstoffs, der typischerweise größer ist als die vom Laser bestrahlte Fläche, weiß leuchtet. An diese Zone schließt sich ein großer Bereich an, in welcher der Leuchtstoff gelb glimmt.

Um jedoch auf der Rückseite eines Leuchtstoffs eine weiße Lichtemission zu erzeugen muss die Energiedichte an der Anregungsseite erhöht werden. Hierbei kann es, wie in Teil B der Abbildung dargestellt, bedingt durch temperaturbasiertes Quenching oder einen Sättigungseffekt der Aktivator-Ionen, zu einer lokalen Emission von größtenteils nicht konvertierter Strahlung an der Anregungsseite kommen. Im Fall der Sättigung ist die Anregungs-Energiedichte so hoch, dass sich, lokal betrachtet, fast alle zur Verfügung stehenden Aktivator-Ionen in einem

angeregten Zustand befinden. Diese Energie wird an das Wirtsgitter übertragen und gemäß dem Stokes Shift teilweise als konvertierte Strahlung emittiert. Durch die hohe Energiedichte wird jedes Ion, das wieder in seinen Grundzustand übergeht, erneut angeregt. Durch den Mangel an Aktivatoren im Grundzustand kann der Rest der einstrahlenden Photonen jedoch nicht absorbiert werden. Als Folge wird ein gegenüber dem Regelfall höherer Anteil von Anregungsstrahlung nicht beziehungsweise erst in entfernteren Regionen des Kristalls in energieärmere Strahlung konvertiert. Der Leuchtstoff ist übersättigt und emittiert in der Region der höchsten Energiedichte größtenteils blaues Licht.

In Teil C der Abbildung ist ein Fall mit weiter erhöhter Bestrahlungsleistung dargestellt, bei dem sowohl die Anregungs- als auch die Transmissionsseite aufgrund von Sättigung oder Thermal Quenching blaues Licht abstrahlen. Eine Überlagerung beider Effekte ist dabei ebenfalls möglich.

6.2.4 Abstrahlcharakteristik im Fernfeld

Die Farbe der Lichtemission eines Leuchtstoffs ist nicht konstant, sondern weist eine Abhängigkeit vom Abstrahlwinkel ε auf, die je nach Schichtstärke und Konzentration an Streupartikeln mehr oder weniger stark ausgeprägt ist. In Abbildung 6.14 ist die winkelabhängige Emission eines angeregten YAG:Ce-Leuchtstoffs dargestellt. Die Messung erfolgt mittels eines Fernfeld-Goniophotometers (*LMT GO-H 1400*) in einer Messentfernung von 3,16 m. Werte unterhalb von $\varepsilon = 15^\circ$ können durch den Einsatz einer reflektiven Leuchtstoffschicht nicht erfasst werden, da Anregung und Messung auf der selben Seite des Konversionselements erfolgen müssen. Oberhalb von $\varepsilon = 80^\circ$ ist ebenfalls keine Erfassung von Messwerten möglich.

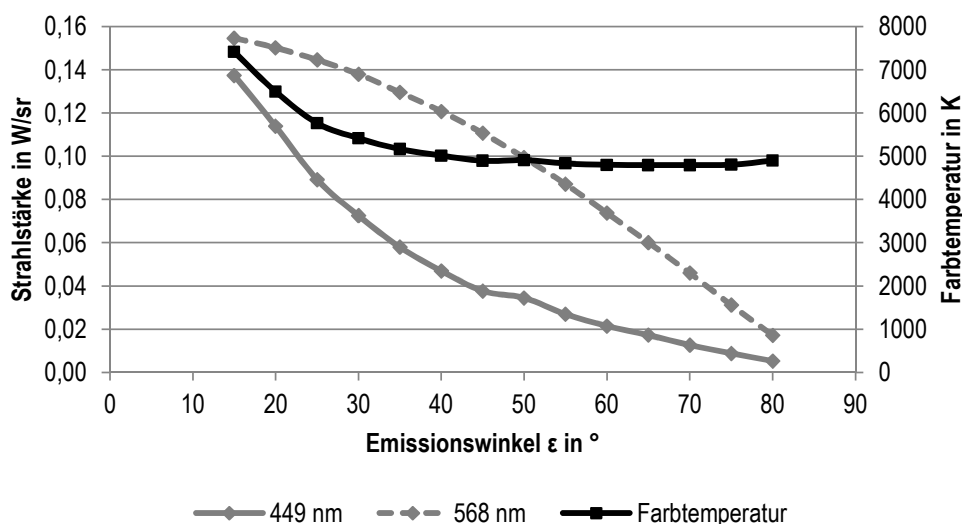


Abbildung 6.14: Messung der Farbtemperatur von keramischem YAG:Ce in reflektivem Aufbau

Die Bestrahlung erfolgt normal zur Leuchtstoffoberfläche mit $\lambda \approx 449 \text{ nm}$. Die Farborte des abgestrahlten Lichts liegen näherungsweise auf einer Geraden im CIE-Farbdreieck, welche die Punkte $\lambda = 449 \text{ nm}$ und $\lambda = 568 \text{ nm}$ miteinander verbindet, so dass sich die in Abbildung 6.14

gewählte Aufspaltung der emittierten Strahlstärke in einen nicht konvertierten Teil bei 449 nm und einen konvertierten Teil bei etwa 568 nm anbietet. Zusätzlich ist die emittierte Farbtemperatur angegeben.

Im Bereich zwischen $\varepsilon = 15^\circ$ und $\varepsilon = 45^\circ$ fällt die emittierte Farbtemperatur von 7400 K monoton mit steigendem Emissionswinkel ab. Im Bereich $45^\circ < \varepsilon < 80^\circ$ ist die Farbtemperatur nahezu konstant und liegt zwischen 4800 K und 5000 K . Dabei ist zu beachten, dass der Messkopf durch seine endliche Ausdehnung über einen Winkel von $1,09^\circ$ integriert, so dass lokale Schwankungen der Farbtemperatur, wie sie in Abbildung 6.8 dargestellt sind, nicht aufgelöst werden können. Die geringfügige Messabweichung bei $\varepsilon = 50^\circ$ lässt sich so durch das Vorhandensein einer lokal schwankenden Farbtemperatur erklären.

Je größer der Winkel ε ist, desto größer ist auch der Weg, den ein Photon im Mittel innerhalb der Leuchtstoffschicht zurücklegt. Deshalb nimmt auch die Wahrscheinlichkeit zu, dass das Photon zu Licht mit höherer Wellenlänge konvertiert wird. Demzufolge nimmt der Anteil nicht konvertierter Strahlung mit steigendem Winkel ε stärker ab als der Anteil konvertierter Strahlung, so dass die Farbtemperatur mit steigendem Winkel ε abnimmt.

Gemäß Gleichung 5.5 gilt für die in ein infinitesimal kleines Ringsegment emittierte Strahlstärke

$$d\Phi = I_0 \pi \sin(2\varepsilon) d\varepsilon. \quad (6.7)$$

Diese Funktion weist ein Maximum bei $\varepsilon = 45^\circ$ auf. Demzufolge hat die Emission des Leuchtstoffs nahe dem Winkel $\varepsilon = 45^\circ$ den größten Einfluss auf den integral emittierten Farbort. Eine Abhängigkeit der Lichtfarbe vom Winkel wird jedoch von den meisten Scheinwerfersystemen als Farbabweichung in das Fernfeld der Lichtverteilung übertragen und überlagert sich hier mit den chromatischen Fehlern des Systems, die gegebenenfalls eingesetzte refraktive optische Elemente im Strahlengang mit sich bringen. Vor allem die direkte Reflexion unkonvertierten Lichts an der Oberfläche des Leuchtstoffs, die mit diesem Versuchsaufbau aus geometrischen Gründen nicht vollständig erfasst werden kann, muss bei der Auslegung eines Fahrzeugscheinwerfers berücksichtigt werden.

Eine Vergleichmäßigung der Farbemission kann durch ein Aufrauen der Oberfläche des Leuchtstoffs geschaffen werden. Vor allem wird dadurch auch das an der Oberfläche anderenfalls direkt reflektierte Laserlicht diffus gestreut. Da auch das in den Leuchtstoff eintretende Laserlicht stärker gestreut wird, wird gleichzeitig jedoch der Bereich der Lichtemission vergrößert. Bei transmissivem Einsatz des Leuchtstoffs bietet sich hingegen das Aufrauen der Emissionsseite an, was keine nennenswerte Auswirkung auf die Größe der lichtemittierenden Fläche hat. Eine Strukturierung der Anregungsseite hingegen weist den Vorteil auf, dass der an der Oberfläche reflektierte Anteil des Laserlichts gestreut wird, was die Lasersicherheit erhöht.

6.2.5 Anforderungen an Leuchtstoffe für Fahrzeugscheinwerfer

In diesem Abschnitt werden die zuvor erarbeiteten Anforderungen an Leuchtstoffe zum Einsatz im Fahrzeugscheinwerfer zusammengefasst:

- Der Leuchtstoff soll über einen hohen Wirkungsgrad verfügen, um mit einer möglichst geringen Anzahl an Laserdioden den für eine Lichtfunktion benötigten Lichtstrom zu erzeugen.
- Der Leuchtstoff muss bei jedem möglichen Betriebszustand ECE-konformes weißes Licht abstrahlen. Zurzeit werden im Fahrzeugumfeld hohe Farbtemperaturen um 5500 K bevorzugt, so dass der CIE-Farbort $x = 0,33 / y = 0,34$ als ideal angesehen wird. Dabei muss das abgestrahlte Spektrum die Forderungen der ECE nach einem Mindest-Rotanteil erfüllen. Der Farbwiedergabeindex sollte mindestens die von Xenonscheinwerfern mit $R_a \approx 65$ erreichen, um eine gute Erkennbarkeit von farbigen Objekten zu gewährleisten.
- Um die Abnahme des Wirkungsgrads durch Thermal Quenching zu vermeiden wird der Einsatz von keramischen Leuchtstoffen empfohlen, da diese über eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit verfügen. Zur Verbesserung der Wärmeabfuhr ist zudem der reflektive Einsatz des Leuchtstoffes zu empfehlen, welcher dann auf einen metallischen Träger aufgebracht werden kann.
- Der Farbort des Leuchtstoffs soll möglichst wenig von dessen Temperatur abhängig sein, da in Scheinwerfern mit Temperaturen von -40°C bis $+80^\circ\text{C}$ gerechnet werden muss und eine aktive Temperaturregelung des Leuchtstoffs aufwändig ist. Manche Systeme wie das hier betrachtete Zusatzfernlicht können abgeschaltet werden, wenn die Leuchtstofftemperatur einen hinsichtlich der Lichtfarbe kritischen Wert erreicht. Für die meisten Systeme ist jedoch eine derartige Lösung nicht möglich. Sie müssen unabhängig vom Betriebszustand eine zulassungskonforme Lichtfarbe und -menge abstrahlen. Außerdem können Veränderungen im Farbort auch ohne die ECE-Regelungen zu verletzen von Kunden als unangenehm wahrgenommen werden.
- Auf der einem Seite soll die Lichtemission mit möglichst geringer Étendue erfolgen. Hier bietet sich ein Leuchtstoff an, der nur über eine geringe Menge an Streupartikeln verfügt. Auf der anderen Seite soll die Abstrahlung hinsichtlich des Farborts möglichst winkelunabhängig sein, was durch eine stärkere Streuung im Leuchtstoff erzielt werden kann. Beide Forderungen stehen im Widerspruch zueinander, so dass je nach Anwendungsfall ein geeigneter Kompromiss gefunden werden muss. Der Winkelabhängigkeit der Lichtemission kann im begrenzten Umfang durch die Gestaltung des optischen Scheinwerfersystems entgegengewirkt werden. Strahlt ein Leuchtstoff zum Beispiel bei kleinen Abstrahlwinkeln ε hohe Farbtemperaturen und bei große Winkel niedrigere ab, so sollte Licht aus beiden Bereichen beim Formen der Lichtverteilung überlagert werden, um Farbeffekte zu vermeiden.
- Darüber hinaus soll nach Schug et al. der Leuchtstoff von jedem lichtemittierenden Punkt der Oberfläche die gleiche Lichtfarbe abstrahlen [SCHU14]. Anderenfalls wird die-

ser Farbfehler vom Scheinwerfersystem in den Verkehrsraum abgebildet. Auch diesem Effekt kann durch eine geschickte Gestaltung des optischen Systems in Grenzen entgegengewirkt werden.

- Die direkte Reflektion von Laserlicht an der Leuchtstoffoberfläche ist vor allem bei einem reflektiv eingesetzten Konverter kritisch. Ein Aufrauen der Leuchtstoffoberfläche minimiert diesen Effekt, welcher auch hinsichtlich der Lasersicherheit des Systems vermieden werden soll.
- Der Leuchtstoff soll eine möglichst hohe mechanische Festigkeit und Schlagfestigkeit aufweisen, um die Gefahr eines Bruchs zu vermindern. Hierfür bietet sich ebenfalls ein reflektiv eingesetzter Leuchtstoff auf einem Metallträger an.

6.3 Muster I

Das erste Muster des Scheinwerfermoduls arbeitet nach dem Prinzip der Frontprojektion (Konzept B aus Abschnitt 5.2.5). Dieser Ansatz ermöglicht einen einfachen Aufbau, bei dem nur wenige strahlformende und -lenkende Elemente zum Einsatz kommen. Dadurch ist ein hoher Systemwirkungsgrad bei geringer mechanischer Störanfälligkeit realisierbar. Der Leuchtstoff kann sehr einfach an der Rückseite des gestutzten Paraboloidreflektors montiert werden. Der gewählte Ansatz liefert außerdem eine erhöhte Sicherheit bei einem Versagen des Konvertermaterials, da die Laserdioden nach hinten, in das Modul hinein emittieren.

Nachteilig ist jedoch, dass gemäß Abschnitt 5.3.4 nicht alles Licht durch einen Paraboloidreflektor in die beabsichtigte Richtung umgelenkt werden kann. Zur Steigerung des Wirkungsgrads kommt deshalb, wie in Abschnitt 5.3.5 vorgeschlagen, eine Kunststofflinse zum Einsatz, die das von Reflektor nicht erfasste Licht kollimiert.

Der optische Aufbau des Moduls ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Die reflektive Leuchtstoffschicht wird mit vier Laserdioden bestrahlt, deren Licht durch Bohrungen in den seitlichen Reflektorflächen in das Innere des Reflektors gelangt. Dadurch treffen die Lichtstrahlen unter einem relativ flachen Winkel auf die Konversionsschicht.

Der Reflektor besteht aus neun paraboloidförmigen Segmenten, welche die gewünschte, in horizontaler Richtung verbreiterte Lichtverteilung erzeugen (vergleiche Abbildung 6.16 A). Die Brennpunkte der einzelnen Facetten befinden sich in unmittelbarer Nähe des bestrahlten Punkts auf dem Leuchtstoff, so dass jedes Segment nahezu paralleles Licht emittiert. Da die Paraboloidsegmente um die Hochachse des Moduls verdreht angeordnet sind, wird ein Bereich von $\pm 4^\circ$ horizontal ausgeleuchtet.

In Abbildung 6.15 wird das optische Konzept vereinfacht zweidimensional betrachtet, wobei der Leuchtstoff als ideale Punktlichtquelle angenommen wird, die ausschließlich in den 2π -Halbraum abstrahlt. Das in den als *Raumwinkel Reflexion* bezeichneten Winkelbereich abgestrahlte Licht wird vom Reflektor umgelenkt. Das restliche Licht wird durch die zusätzliche

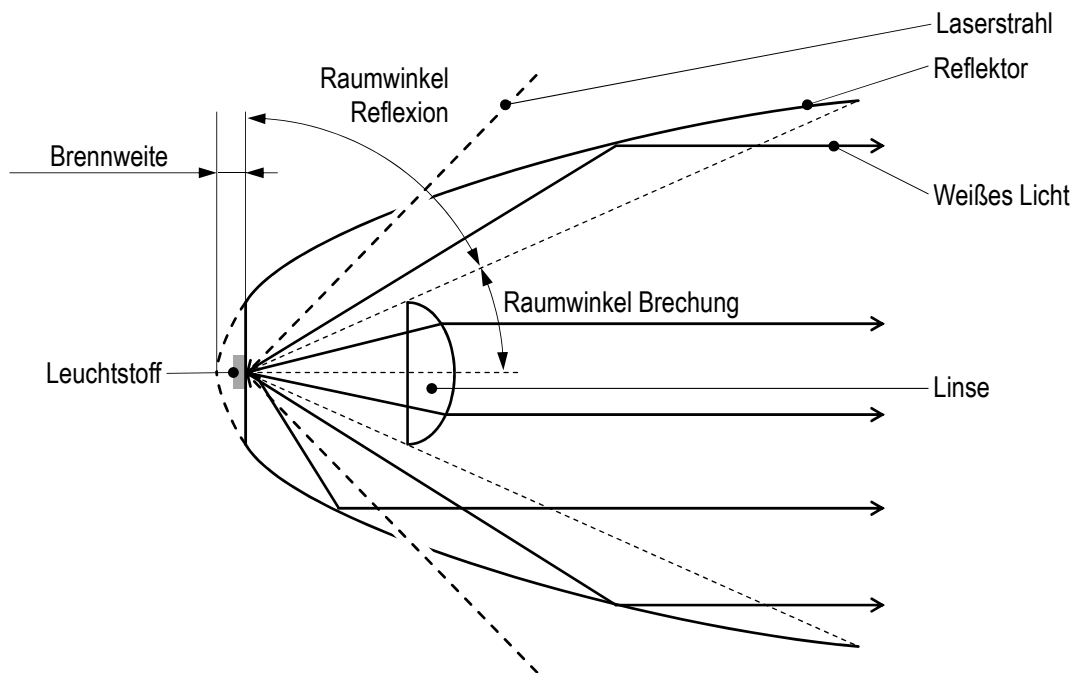


Abbildung 6.15: Optisches Konzept der Muster I und II nach [LACH14c]

Linse in die gewünschte Richtung gebracht. Position und Durchmesser der Linse werden gemäß der Herleitung in Abschnitt 5.3.5 so gewählt, dass die Linse das nicht durch den Reflektor umgelenkte Licht erfasst, ohne dass sie sich dabei im Strahlengang des bereits vom Reflektor umgelenkten Lichts befindet.

Der Paraboloidreflektor weist eine Ausnehmung an seiner Rückseite auf, an welcher der Leuchtstoff montiert wird. Der Durchmesser der Linse wird auf den Durchmesser dieser Ausnehmung begrenzt, um keine Abschattung im Lichtbild des Reflektors zu verursachen. Die Linse wird als rotationssymmetrische, asphärische Kollimationsoptik gestaltet, welche über eine plane Rückseite verfügt. Sie verfügt über drei Stege, mit denen sie in schlitzförmigen Aussparungen des Reflektors befestigt und verklebt wird (Abbildung 6.16). Die lichtabstrahlende Fläche des Leuchtstoffs wird von der Linse ins Unendliche abgebildet, so dass die Form und Größe dieser Fläche in Kombination mit der Brennweite der Linse den Öffnungswinkel des von der Linse abgestrahlten Lichtkegels definieren.

6.3.1 Materialien und Fertigungsverfahren

Reflektoren für Serienscheinwerfer bestehen aus Kunststoff und werden typischerweise im Spritzguss hergestellt und anschließend mit einer Reflexionsbeschichtung sowie einer Korrosionsschutzschicht versehen. Asphärische Glaslinsen werden im Blankpressverfahren erzeugt.

Für den Musterbau sind jedoch Fertigungsverfahren zu bevorzugen, die für geringste Losgrößen geeignet sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Reflektoren spanend auf einer 5-Achs HSC-Fräse vom Typ *imes-icore 4030 μ premium* hergestellt und anschließend per Hand poliert. Als Material kommt die Aluminiumlegierung AlMgSi1 zum Einsatz (Werkstoffnummer 3.2315,

EN AW-6082). Bei diesem Material kann auf eine Reflexionsbeschichtung verzichtet werden, da es bereits über einen ausreichend hohen Reflexionsgrad verfügt. Der Einfluss von Korrosion auf die Reflexionseigenschaften wird hier nicht näher betrachtet.

Die Kunststofflinsen werden auf der gleichen Maschine hergestellt. Dabei kommen Diamantfräser zum Einsatz, da sich vor allem mit monokristallinen Diamantwerkzeugen gute Oberflächenqualitäten der PMMA-Optiken einstellen lassen. Die in diesem Muster und in Muster II eingesetzte Linse verfügt über eine ebene Rückseite, welche nicht formgebend bearbeitet werden muss. Dadurch kann das Bauteil mit geringeren Toleranzen gefertigt werden als es bei vergleichbaren, beidseitig zu bearbeitenden Linsen möglich ist. Eine anschließende Politur per Hand reduziert die Oberflächenrauheit der Linsen.

6.3.2 Ausarbeitung des Moduls

Die vier Laserdioden vom Typ *Osram PL-TB450B*, welche zur Anregung des Leuchtstoffs dienen, werden asymmetrisch am äußeren Rand des Reflektors positioniert (Abbildung 6.16 A). Diese Anordnung ist bedingt durch den Bauraum des Scheinwerfers, in den das Modul integriert werden soll. Die Emission jeder Diode wird mit Hilfe einer Kollimationsoptik so fokussiert, dass ein kleiner Punkt auf dem Leuchtstoff angeregt wird.

Als Frequenzkonverter kommt eines der in Abschnitt 6.2.1 betrachteten pulverförmigen Leuchtstoffpräparate zum Einsatz, das mittels Wärmeleitpaste auf einen Aluminiumträger aufgebracht wird. Dennoch ist die Wärmeabfuhr im Betrieb bei Raumtemperatur unzureichend, so dass es zu Thermal Quenching kommt. Deshalb werden die Laserdioden nicht exakt auf den Leuchtstoff fokussiert sondern ihr Brennpunkt kurz vor beziehungsweise hinter dem Leuchtstoff positioniert. Gleichzeitig muss der Betriebsstrom der Laserdioden auf 450 mA reduziert werden, um Einbußen im Systemwirkungsgrad zu vermeiden und den vom Leuchtstoff abgestrahlten Farbort im akzeptablen Bereich zu halten. Da der Reflexionsgrad der adhäsiven Wärmeleitpaste vergleichsweise gering ist, werden, anders als in Tabelle 5.1 dargestellt, nur geringe Teile des vom Leuchtstoff in Richtung Trägermaterial emittierten Lichts zurückgeworfen und somit nutzbar gemacht.

Bedingt durch die unvermeidbaren Toleranzen der eingesetzten Bauteile ist eine Justage der Laserdioden notwendig. Zum einen muss der Fokuspunkt der Laserstrahlung unmittelbar vor beziehungsweise hinter der Leuchtstoffschicht positioniert werden. Hierzu wird eine Kollimationslinse mit Feingewinde eingesetzt (*Thorlabs C330TME-A*), welche durch ihr Gewinde eine axiale Verschiebung des Brennpunkts ermöglicht. Diese kommerziell erhältliche Linse ist mit einer Antireflexbeschichtung versehen, die im Bereich von 400 nm bis 620 nm bei senkrechtem Lichteinfall Reflexionsverluste unter $0,5\%$ aufweist.

Zum anderen muss jede Diode individuell justiert werden, so dass alle Dioden die gleiche Stelle auf dem Leuchtstoff im Fokuspunkt des Reflektors bestrahlen. Hierzu befinden sich die Dioden in vier unabhängig voneinander einstellbaren Baugruppen. Eine davon ist in Abbildung 6.16 B

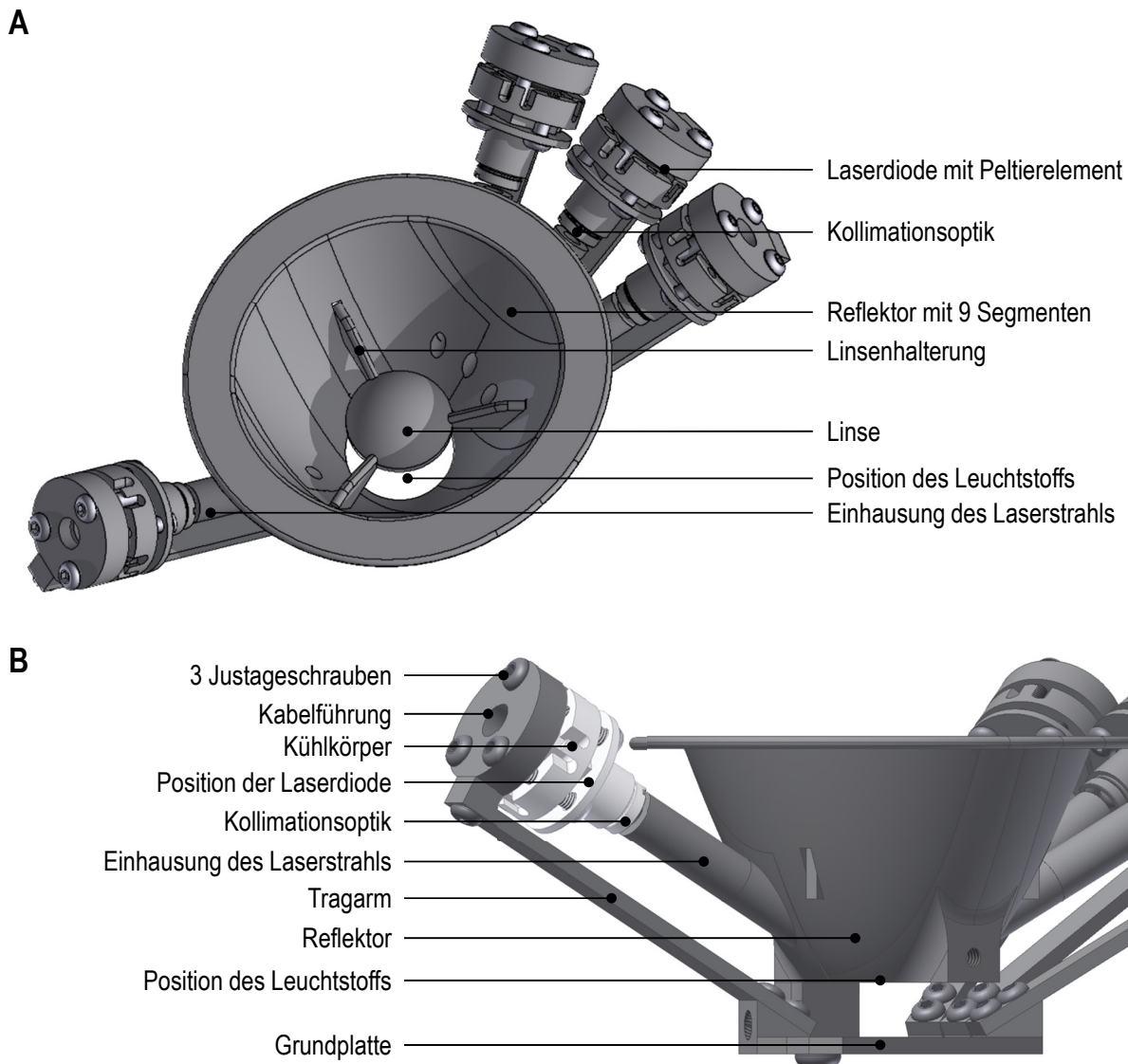


Abbildung 6.16: CAD-Modell des Musters I nach [LACH14c]

heller dargestellt und beinhaltet neben der Lasertiode auch die Kollimationslinse, ein Peltierelement sowie einen Kühlkörper.

Eine Schnittansicht der Justagebaugruppe ist in Abbildung 6.17 dargestellt. Relativ zu einem feststehenden Teil, der mit dem Reflektor verbunden ist, kann der in der Abbildung obere Teil der Baugruppe über einen gummielastischen O-Ring verkippt werden. Der bewegliche Teil besteht aus der Lasertiode mit Kollimationsoptik sowie Peltierelement und Kühlkörper. Die elektrische Kontaktierung der Diode erfolgt über einen Stecksockel, um eine zu hohe thermische Belastung der Halbleiterlichtquelle beim Löten zu vermeiden. Die Diode selbst wird mit einem Niederhalter fixiert. Drei Justageschrauben ermöglichen das Einstellen der Emissionsrichtung des fokussierten Laserstrahls. Die Längenänderung der Baugruppe durch Komprimieren des gummielastischen O-Rings wird vernachlässigt, wobei die zum Komprimieren notwendige Kraft ein versehentliches Lösen der Justageschrauben verhindern soll.

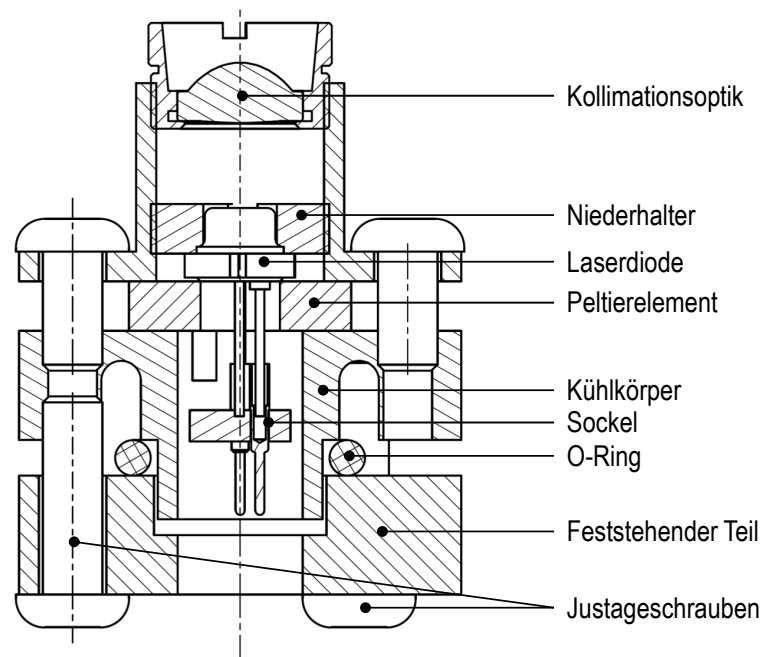


Abbildung 6.17: Justagebaugruppe mit Laserdiode und Kollimationsoptik

In Abbildung 6.18 werden Fotos des am Institut gefertigten Musters I gezeigt. Kunststofflinse und Aluminiumreflektor sind im rechten Teil der Abbildung in einen Fahrzeugscheinwerfer (Porsche *Boxster* Typ 981) integriert. Die Laserdioden, welche sich am Umfang des Reflektors befinden, erzeugen neben dem weißen Licht auf dem Leuchtstoff auch blaues Streulicht, welches seitlich des Moduls in Erscheinung tritt.

Der Verlustwinkel des Reflektors ist, anders als bei den exakten Rotationsparaboloiden, die in Abschnitt 5.3.4 betrachtet werden, vom Umfangswinkel φ abhängig. In horizontaler Richtung ergibt sich ein Verlustwinkel $\varepsilon_{1,h}$ von $39,31^\circ$. In vertikaler Richtung unterscheiden sich die Werte für die obere und die untere Hälfte geringfügig, da sich die Ausrichtung der Facetten in beiden Hälften unterscheidet. Es gilt $\varepsilon_{1,v,oben} = 38,45^\circ$ und $\varepsilon_{1,v,unten} = 37,78^\circ$. Gemäß Gleichung 5.19 können mit diesem Reflektor etwa 61% des Lichtstroms umgelenkt werden, der von der als Lambertstrahler angenommenen Lichtquelle emittiert wird. Die verbleibenden 39% werden von der zusätzlichen Linse parallelisiert.

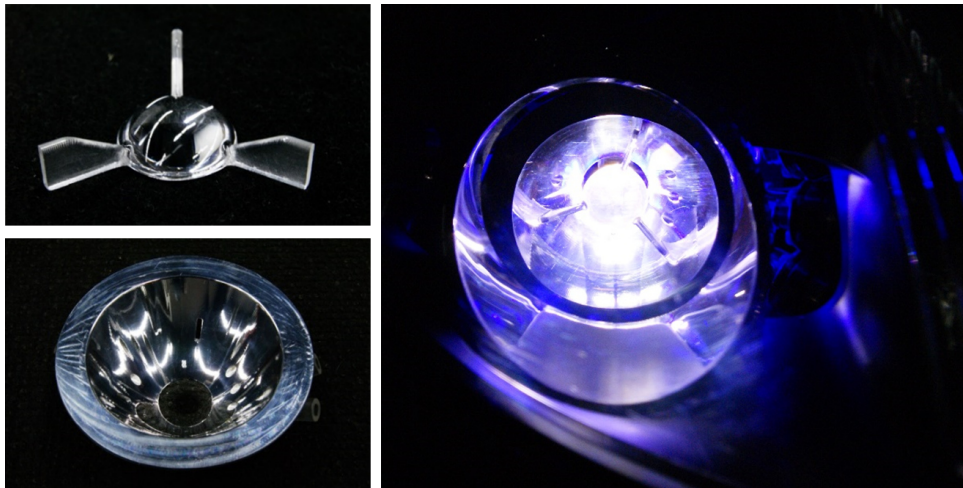


Abbildung 6.18: Fotos des Moduls I: Linse und Reflektor sowie Modul in Scheinwerfer integriert, [LACH14c]

6.3.3 Simulation

Die Lichtverteilung des Moduls wird mit der Software *Zemax* mittels Raytracing im sogenannten nichtsequentiellen Modus simuliert. Dieser vereinfachende Ansatz der Strahlenoptik ist zur Beschreibung der Lichtausbreitung geeignet, wenn Beugungseffekte vernachlässigt werden können. Für die Simulation der Lichtpropagation vom Leuchtstoff über Reflektor und Linse ins Fernfeld des Systems ist der Ansatz sehr gut geeignet, da alle geometrischen Größen die Wellenlänge des Lichts deutlich übersteigen. Für die Lichtausbreitung von der Laserdiode zum Leuchtstoff hingegen, die hier nicht betrachtet wird, sollte ein wellenoptischer Ansatz verfolgt werden, um Beugungs- und Interferenzeffekte berücksichtigen zu können.

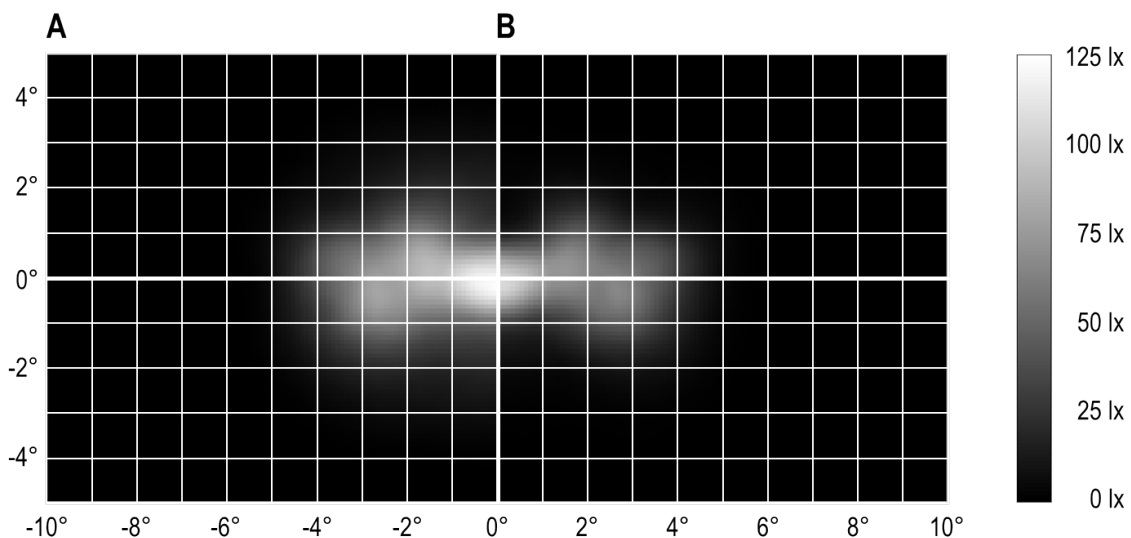


Abbildung 6.19: Simulation der Lichtverteilung des Moduls I, A) mit Linse, B) ohne Linse

Anstatt die reale Lichtquelle, bestehend aus vier Laserdioden und Leuchtstoff zu simulieren, wird der angeregte Bereich des Leuchtstoffs als Lambertstrahler modelliert, welcher über die Anregungsfläche eine konstante Leuchtdichte emittiert. Der Aluminiumreflektor wird mit ei-

nem Reflexionsgrad von 93,7% angenommen, was der Aluminiumbeschichtung *Metal2* des Simulationsprogramms *Zemax* entspricht. Fresnelreflexionen an der als ideal transparent angenommenen PMMA-Linse werden berücksichtigt. Für die Simulation werden die zwei Wellenlängen 543,8 nm und 632,8 nm genutzt, so dass die chromatische Aberration der Linse zum Teil berücksichtigt wird. Da der pulverförmige Leuchtstoff leicht ins Thermal Quenching gerät, darf, wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben, die anregende Laserstrahlung nur mäßig stark fokussiert werden. Deshalb wird die angeregte Fläche des Leuchtstoffs als vergleichsweise großes Rechteck mit 2 mm horizontaler und 1 mm vertikaler Kantenlänge simuliert. Der Lichtstrom wird mit 470 lm angenommen.

Alle optischen Flächen werden unter Vernachlässigung der Fertigungsgenauigkeit als ideal glatt angenommen. Die Simulation, deren Ergebnis in Abbildung 6.19 dargestellt ist, bezieht sich ausschließlich auf das Fernlichtmodul, so dass die Abschlusscheibe des Fahrzeugscheinwerfers nicht berücksichtigt wird.

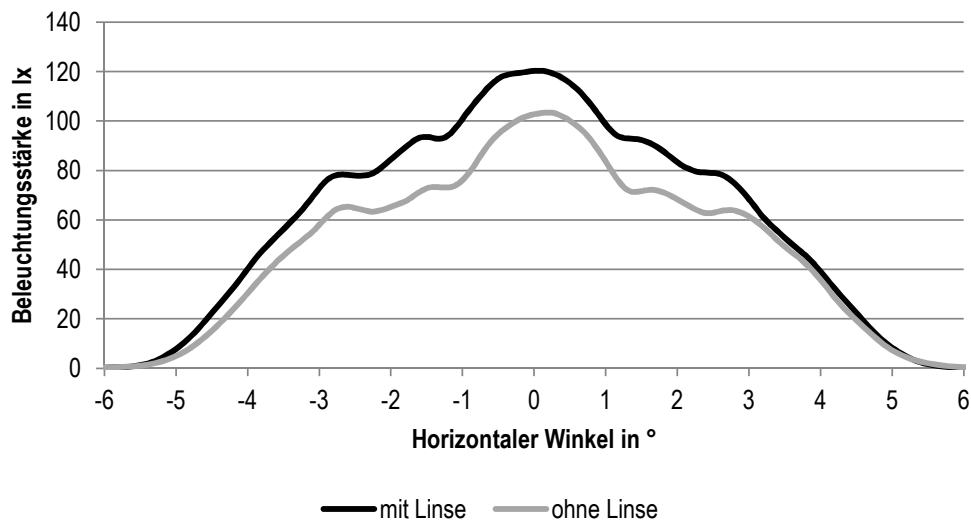


Abbildung 6.20: Horizontaler Schnitt durch die simulierte Lichtverteilung des Musters I

Abgesehen von den asymmetrisch angeordneten Lichteintrittsbohrungen ist das optische System des Laserzusatzfernlichts gegenüber der Ebene, die von der optischen Achse und der Vertikalen aufgespannt wird, symmetrisch. Demzufolge ist auch die erzeugte Lichtverteilung nahezu symmetrisch zur Vertikalen. In Abbildung 6.19 wird deswegen auf die Darstellung beider nahezu identischer Bildhälften verzichtet. Stattdessen ist in Bildteil A die simulierte Lichtverteilung von Reflektor und Linse und in Bildteil B das Ergebnis ohne Kunststofflinse dargestellt.

Während die Breite der Lichtverteilung vom Einsatz der Linse unbeeinflusst bleibt, vergrößert sie vor allem im Zentrum die erzeugte Beleuchtungsstärke maßgeblich (vergleiche Abbildung 6.20). Die leichte Abweichung von der oben beschriebenen Vertikalsymmetrie durch die asymmetrische Anordnung der vier Lichteintrittsbohrungen lässt sich gut erkennen.

Die Ursache für die gegenüber der Horizontalen asymmetrische Lichtverteilung in Abbildung 6.19 ist die Anordnung der Reflektorsegmente. Alle Facetten lenken das Licht auf die horizontale 0° -Linie, wobei jedoch die Segmente der oberen und der unteren Reflektorhälfte unterschiedliche horizontale Bereiche adressieren. Die endliche Ausdehnung der Lichtemissionsfläche bewirkt im Zusammenspiel mit den lokal veränderlichen Abbildungsmaßstäben und den nicht identischen Brennpunkten der Facetten des Reflektors dieses zur Horizontlinie asymmetrische Lichtbild.

6.3.4 Messergebnisse

Für die in Abbildung 6.21 dargestellte Messung wird das Lasermodul bei Raumtemperatur mit einer optischen Ausgangsleistung der Dioden von etwa 2 W betrieben. Diese Reduktion der Ausgangsleistung ist, wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben, notwendig, um Thermal Quenching des eingesetzten Leuchtstoffs zu verhindern. Bedingt durch die unterdimensionierten Kühlflächen kann das Modul nicht im thermischen Gleichgewicht betrieben werden. Zur Erhöhung der abgeführten Wärmemenge werden die Justagebaugruppen mit Druckluft gekühlt. Dennoch ist kein stationärer Betrieb des Moduls möglich.

Die Lichtverteilung des Fernlichtmoduls wird auf einem Goniophotometer des Typs *GO-H 1400* der Firma *LMT* vermessen. Der in 25 m Entfernung befindliche Messkopf entspricht der höchsten Genauigkeitsklasse L der DIN 5032 Teil 7. Aufgrund der instationären Betriebsweise des Moduls steigt die Diodentemperatur während der Messung an. Deshalb wird die Vermessung der Lichtverteilung in Intervallen durchgeführt und das System zwischenzeitlich zur Kühlung deaktiviert. Die Vermessung der Lichtverteilung des Lasermoduls erfolgt ohne Abschluss Scheibe, welche im realen Einsatz den Wirkungsgrad des Systems durch Fresnelreflexion herabsetzt.

Die vom System erzeugte Lichtverteilung ist nahezu symmetrisch zur Vertikalen, so dass die geteilte Darstellung aus Abbildung 6.19 auch zur Präsentation der Messergebnisse genutzt wird. In Teil A von Abbildung 6.21 ist die von Reflektor und Linse gemeinsam erzeugte Lichtverteilung dargestellt. Das Maximum der Beleuchtungsstärke liegt bei $83,75\text{ lx}$. Im rechten Teil B der Abbildung ist die Lichtverteilung des selben Moduls ohne Linse dargestellt. Die maximale Beleuchtungsstärke liegt hier um 10 lx niedriger bei $73,71\text{ lx}$. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass durch den Einsatz der Linse der Wirkungsgrad des Systems signifikant verbessert wird.

Im Vergleich zur Simulation ist die gemessene Lichtverteilung nahezu symmetrisch zur Horizontalen. Ursache hierfür ist sicherlich, dass die Simulation auf einer scharf begrenzten Lichtemissionsfläche basiert. In der Realität jedoch nimmt die Emissionsleuchtdichte des Leuchtstoffs von der Mitte nach außen hin allmählich ab. Die gemessenen Beleuchtungsstärken des Moduls liegen deutlich unter den simulierten Werten. Der Grund hierfür kann ein geringerer Reflexionsgrad des Aluminiumreflektors oder ein geringerer vom Leuchtstoff emittierter Lichtstrom sein.

Zum Vergleich ist die Lichtverteilung eines handelsüblichen Zusatzfernlichts eines Gasentladungsscheinwerfers dargestellt (Abbildung 6.21 C). Dieses Modul erzeugt mit einer Halogen-

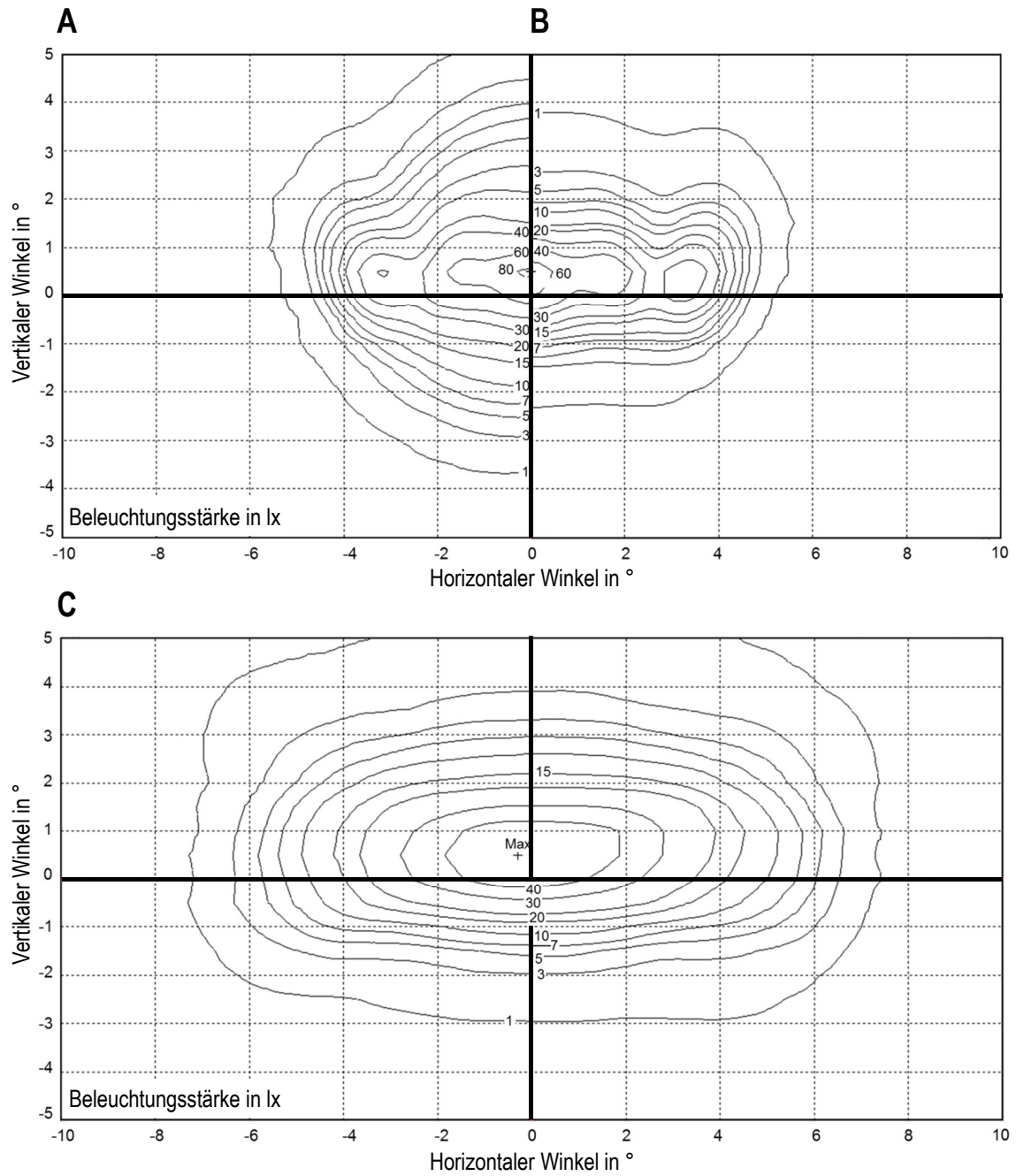


Abbildung 6.21: Gemessene Lichtverteilungen von Zusatzfernlicht-Modulen nach [LACH14c]
 A) Muster I mit Linse, B) Muster I ohne Linse,
 C) Halogen-Zusatzfernlicht (*Porsche 911 Typ 991*)

lampe des Typs H7 und einem Freiformreflektor eine horizontal aufgeweitete Lichtverteilung. Das Maximum der Beleuchtungsstärke liegt bei $52,30 \text{ lx}$, gemessen mit Abschlusscheibe des Fahrzeugscheinwerfers. Ohne geneigte und gepfeilte Abschlusscheibe könnte das Modul ungefähr 60 lx erzeugen, was immer noch deutlich unter der vom Lasermodul erzeugten maximalen Beleuchtungsstärke von $83,75 \text{ lx}$ liegt.

Das Lasermodul erzeugt eine Lichtverteilung, welche bezogen auf die 40 lx -Linie $4,6^\circ$ breit ist. Dieser Wert liegt über den $3,7^\circ$ des klassischen Halogen-Zusatzfernlichts, bei dem allerdings der wirkungsgradmindernde Einfluss der Abschlusscheibe des Scheinwerfers berücksichtigt werden muss. Bei 10 lx kommt das Lasermodul auf eine horizontale Breite von $8,6^\circ$. Das Halogensystem erzeugt mit $10,1^\circ$ keine so scharf begrenzte Lichtverteilung.

Der Lichtstrom des klassischen Zusatzfernlichts ist deutlich höher als der des Lasermoduls, was eine breite Ausleuchtung des Verkehrsraums ermöglicht. Die deutlich kleinere Étendue des angeregten Leuchtstoffs hingegen ermöglicht es, die erzeugte Lichtmenge stark gebündelt abzustrahlen. Dadurch sind die hohe Beleuchtungsstärke im Hot Spot und seitlich davon bis etwa $\pm 4^\circ$ möglich. Gleichzeitig erzeugt das Lasermodul eine Lichtverteilung mit vergleichsweise stark ausgeprägten Gradienten.

6.3.5 Optimierungspotential

Die Positionierung der Laserdioden in einstellbaren Baugruppen am äußeren Umfang des Reflektors benötigt relativ viel Bauraum. Da zur Justage der Dioden das Kühlsystem mitbewegt wird, muss dieses entsprechend kompakt gestaltet werden. Im vorliegenden Fall hat sich die Kühlung als unzureichend herausgestellt. Für das nächste, in Abschnitt 6.4 vorgestellte Muster II werden die Laserdioden deshalb thermisch und mechanisch an eine zentrale Kühleinheit angebunden, wohingegen die Justage der Strahlengänge durch zusätzliche Elemente erfolgt.

Ein weiterer Schwachpunkt des Moduls I sind die eingesetzten pulverförmigen Leuchtstoffe. Trotz Defokussierung der Laserdioden geraten die Leuchtstoffe bei Strömen oberhalb von etwa 450 mA ins Thermal Quenching, so dass eine deutliche sichtbare Blauverschiebung des abgestrahlten Farborts mit steigendem Betriebsstrom auftritt.

Die in Abbildung 6.19 dargestellte Simulation der Lichtverteilung zeigt die Schwächen auf, welche eine unterschiedliche Facettierung der oberen und der unteren Reflektorhälfte mit sich bringt. Auch wenn die Messergebnisse diese Asymmetrie des Lichtbildes nicht so deutlich wiedergeben ist für das nächste Muster eine symmetrische Segmentierung vorzuziehen.

6.4 Muster II

Die Konzeptionierung des Musters II setzt bei dem Optimierungspotential des ersten Musters an, ohne dessen optisches Konzept zu verlassen. Das neue Modul wird für den Einbau

in den Scheinwerfer eines *Porsche 911* Typ 991 ausgearbeitet. Als Bauraum steht der des halogenbasierten Zusatzfernlichts zur Verfügung.

6.4.1 Ausarbeitung des Moduls

Der größte Schwachpunkt des ersten Moduls ist dessen unzureichende Kühlung. Deshalb werden die vier Halbleiterlichtquellen in einem gemeinsamen Block montiert und dort gekühlt, anstatt für jede Diode eine eigene, kompakte Kühlvorrichtung vorzusehen (vergleiche Abbildung 6.22). Die unverzichtbare Justage der Emissionsrichtung der kollimierten Dioden erfolgt über vier individuell justierbare Planspiegel, welche jeweils über zwei rotatorische Freiheitsgrade verfügen. Zum Einsatz kommen kommerzielle aluminiumbeschichtete Spiegel mit einem Durchmesser von 5 mm (*Edmund Optics 48-404*), welche für die Wellenlänge der Laserdioden einen Reflexionsgrad von etwa 98 % aufweisen [EDMU16]. Diese zentrale Anordnung der Laserdioden ermöglicht eine im Vergleich zum ersten Muster deutlich kompaktere Ausgestaltung des Moduls. Auf den Einsatz von Peltierelementen wird verzichtet, da sich ihr Einsatz bei Muster I als nicht zielführend herausgestellt hat. Als Kühlkörper wird ein stranggepresstes Aluminiumprofil mit innenliegenden Lamellen verwendet, an dessen einer Stirnseite ein Axiallüfer angeflanscht ist (vergleiche Abbildung 6.23).

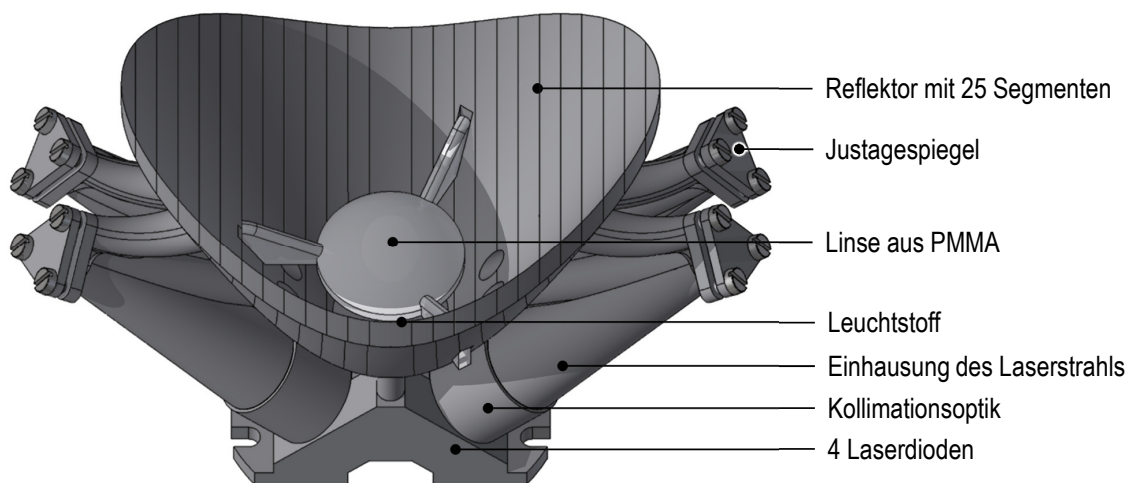


Abbildung 6.22: CAD-Modell des Moduls II, Kühlkörper nicht dargestellt, [LACH14b]

Der im Scheinwerfer zur Verfügung stehende Bauraum ermöglicht eine punktsymmetrische Anordnung von Laserdioden und Eintrittsbohrungen und erhöht dadurch die passive Lasersicherheit. Im Schadensfall des Leuchtstoffs wird die von einer beliebigen Laserdiode emittierte Strahlung vom Trägermaterial des Leuchtstoffs reflektiert und verlässt das System wieder durch die gegenüberliegende Eintrittsbohrung. Wie beim ersten Muster werden die Laserdioden auf den Leuchtstoff beziehungsweise auf einen Punkt in dessen Nähe fokussiert. Die hierfür eingesetzten Kollimationslinsen können über ein Feingewinde axial eingestellt werden. Gegenüber dem ersten Muster wird ein bereits auf einen Aluminiumträger aufgebrachter Leuchtstoff verwendet, der in ein Polymer eingebettet ist und speziell für diesen Anwendungsfall von der Firma

Intematix zur Verfügung gestellt wird. Weitere Spezifikationen dieses Konvertermaterials sind nicht bekannt.

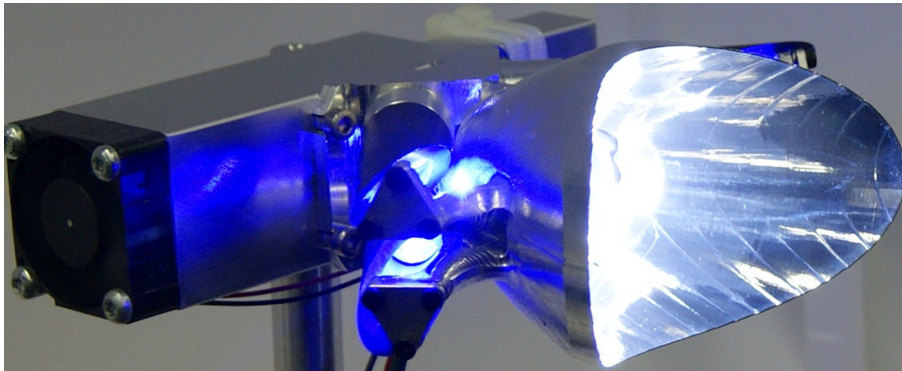


Abbildung 6.23: Foto des Musters II, [GRAB15]

Der Reflektor des Scheinwerfers besteht aus 25 Segmenten, die symmetrisch zur Horizontalen und unter Vernachlässigung der Schlitze für die zusätzliche Sammellinse auch symmetrisch zur Vertikalen sind. Jede Facette ist in ihrer Projektion parallel zur optischen Achse 3 mm breit. Das mittlere Segment (Nr. 0) mit dem Emissionswinkel $\varepsilon = 0^\circ$ weist die doppelte Breite auf, um die Beleuchtungsstärke im zentralen Hot Spot zu erhöhen. Alle Segmente sind Ausschnitte aus Rotationsparaboloiden, die einen gemeinsamen Brennpunkt aufweisen und um den Winkel $\pm\varepsilon$ in horizontaler Richtung gedreht sind (vergleiche Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Facettierung des Reflektors

Facette Nr.	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6
Brennweite f in mm	4,00	3,98	3,93	3,85	3,75	3,63	3,48
Emissionswinkel ε in $^\circ$	0,0	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$	$\pm 4,0$	$\pm 5,0$	$\pm 6,0$
Facette Nr.		± 7	± 8	± 9	± 10	± 11	± 12
Brennweite f in mm		3,32	3,14	2,95	2,75	2,54	2,32
Emissionswinkel in $^\circ$		$\pm 7,0$	$\pm 8,0$	$\pm 9,0$	$\pm 10,0$	$\pm 11,0$	$\pm 12,0$

Das mittlere Segment, welches mit zwei zur Rotationsachse des Paraboloids parallelen Ebenen gestützt wird, weist an den Schnittlinien jeweils die Form einer Parabel auf. Alle anderen Reflektorsegmente weisen eine zu den Schnittebenen verkippte Rotationsachse auf, so dass die Schnittlinien jeweils Teile von Ellipsen sind. Die Geometrie der Schnittflächen benachbarter Facetten sollte möglichst ähnlich sein, um einen stufenlosen Übergang der Reflektorsegmente zu ermöglichen. Für das Muster II werden die Übergangszonen minimiert, indem die Brennweite f von jedem Segment, ausgehend von $f = 4\text{ mm}$ der mittleren Facette, individuell angepasst wird. Dadurch ist ein nahezu stufenloser Übergang zwischen den Segmenten des Reflektors gewährleistet, was einerseits eine präzise Fertigung ermöglicht und andererseits ein gegenseitiges Abschatten der Facetten sowie ungewollte Reflexionen an Übergangszonen effektiv verhindert. Die Brennweite der Facetten nimmt mit steigendem Emissionswinkel ab und beträgt für die äußeren Segmente jeweils $2,32\text{ mm}$. Der äußere, in Abbildung 6.22 obere Rand des Reflektors

wird durch den Schnitt der Facetten mit einer extrudierten Ellipse beschrieben. Dabei wird die Größe der Ellipse mit den Halbachsen 38 mm und 25 mm durch den zur Verfügung stehenden Bauraum im Fahrzeugscheinwerfer einschließlich der zur Justage notwendigen Spaltmaße definiert.

Die Lichtverteilung wird mit $-12^\circ \leq \varepsilon \leq 12^\circ$ gegenüber dem ersten Muster breiter ausgelegt und durch eine gesteigerte Anzahl an Facetten erzeugt, so dass sich ein homogeneres Lichtbild ergibt. Alle vier Laserdioden sollen einen in horizontaler Richtung ausgedehnten ovalen bis rechteckigen Lichtfleck auf dem Leuchtstoff erzeugen. Dazu ist es notwendig, jede Diode vor der Montage um $13,4^\circ$ um ihre Längsachse zu drehen. Zum Sicherstellen dieses Winkels werden die Senkungen, in der die Laserdioden montiert werden, jeweils mit einer Erhebung versehen, die in eine Nut am Umfang der jeweiligen Diode passt. Die horizontale Ausdehnung des lichtemittierenden Bereichs wird genutzt, um die Übergänge zwischen den 25 Facetten des Reflektors in der erzeugten Lichtverteilung zu verwischen. Andererseits ist durch das Drehen der Dioden der Lichtfleck auf dem Leuchtstoff in vertikaler Richtung stark begrenzt und ermöglicht das Erzeugen einer in dieser Richtung scharfen Lichtverteilung.

Der Verlustwinkel des Reflektors wird gegenüber dem ersten Muster leicht reduziert. In horizontaler Richtung beträgt er $\varepsilon_{1,h} = 33,02^\circ$ und in vertikaler $\varepsilon_{1,v} = 35,49^\circ$. Gemäß Gleichung 5.19 können mit diesem Reflektor etwa 68 % des Lichtstroms von der als Lambertstrahler emittierenden Punktlichtquelle umgelenkt werden. Die verbleibenden 32 % werden von der zusätzlichen PMMA-Linse parallelisiert, welche aus dem ersten Muster unverändert übernommen wird. Hierfür ist lediglich eine Anpassung der Halter an die Reflektorgeometrie notwendig.

Der Reflektor stellt das zentrale Bauteil dieses Moduls dar, an welchem die weiteren Komponenten montiert werden. Die mechanische Stabilität dieses Bauteils ist entscheidend für die Präzision der Lichterzeugung des gesamten Moduls und muss auch im Betrieb bei erhöhten Umgebungstemperaturen sichergestellt sein. Im betrachteten Aufbau kommt ein Reflektor aus Aluminium zum Einsatz, da dieses Material einerseits auch ohne Beschichtung als Spiegelfläche genutzt werden kann und es andererseits gute mechanische und thermische Eigenschaften vereint. Die Fertigung dieses Bauteils, welches über vier Montagearme für die Justagespiegel verfügt, ist jedoch aufwändig und nur auf einer 5-Achs-Fräse sinnvoll zu handhaben. Als Alternative dazu wird in [LACH15a] und [KLOP16a] die Fertigung im Lasersinterverfahren betrachtet.

Eine gute thermische Anbindung der Laserdioden an die Kühleinheit ist notwendig, um die Verlustleistung der Lichtquelle abführen zu können, ohne dass sich die Diode selbst zu stark erhitzt. Der thermische Widerstand zwischen elektrischer Kontaktierung des Halbleiterkristalls (Junction) und Wärmesenke ist abhängig von der Gehäusefläche, die thermisch mit der Umgebung verbunden ist. Osram gibt für die Kontaktierung der ringförmigen Fläche an der Rückseite des Diodengehäuses, welche die elektrischen Anschlüsse umgibt, einen thermischen Widerstand von $R_{th} = 16,3\text{ K/W}$ und für die zylinderförmige Mantelfläche von $R_{th} = 15,5\text{ K/W}$ an [OSRA13b]. Im Scheinwerfermodul wird die Diode wie in Abbildung 6.24 dargestellt über den ringförmigen Teil der Rückseite sowie über große Teile der Mantelfläche

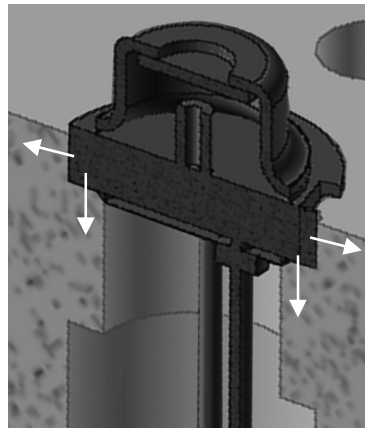


Abbildung 6.24: Thermische Anbindung der Laserdiode, Schnittansicht

thermisch kontaktiert. Auf dieser Grundlage wird der zu berücksichtigende thermische Widerstand mit $R_{th} = 16,0 \text{ K/W}$ abgeschätzt. Die toleranzbedingten Lücken zwischen Laserdiode und Montageflächen werden mit Wärmeleitpaste verfüllt, für die $R_{th} = 1,0 \text{ K/W}$ gilt.

6.4.2 Simulation

Für die Simulation der Lichtverteilung des Musters wird, wie in Abschnitt 6.3.3, die kommerzielle Software *Zemax* (mittlerweile *Zemax OpticStudio*) genutzt. Die chromatische Aberration der Linse wird vernachlässigt. Der Reflexionsgrad des Aluminiumreflektors wird mit 93,7 % angenommen, was der Aluminiumbeschichtung *Metal2* des Simulationsprogramms *Zemax* entspricht. Fresnelreflexionen an der Linse werden berücksichtigt, Volumenabsorption des Kunststoffmaterials jedoch vernachlässigt. Der Leuchtstoff wird als quadratischer Lambertstrahler mit einer Kantenlänge von 1 mm simuliert, der einen Lichtstrom von 470 lm abstrahlt. Somit werden, abgesehen von der reduzierten Größe der Lichtemissionsfläche, die für die Simulation von Muster I getroffenen Annahmen übernommen.

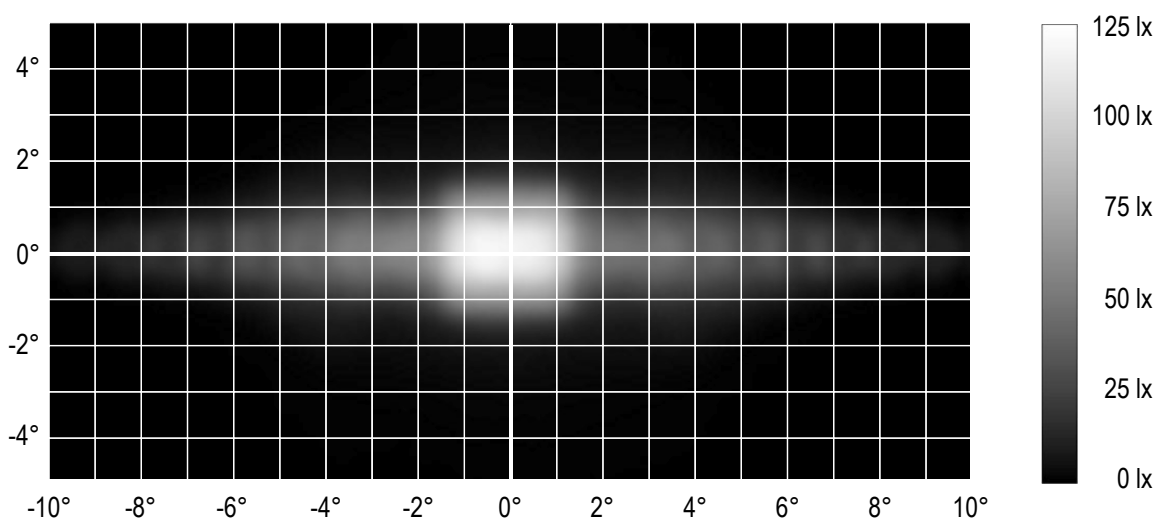


Abbildung 6.25: Simulation der Lichtverteilung des Musters II

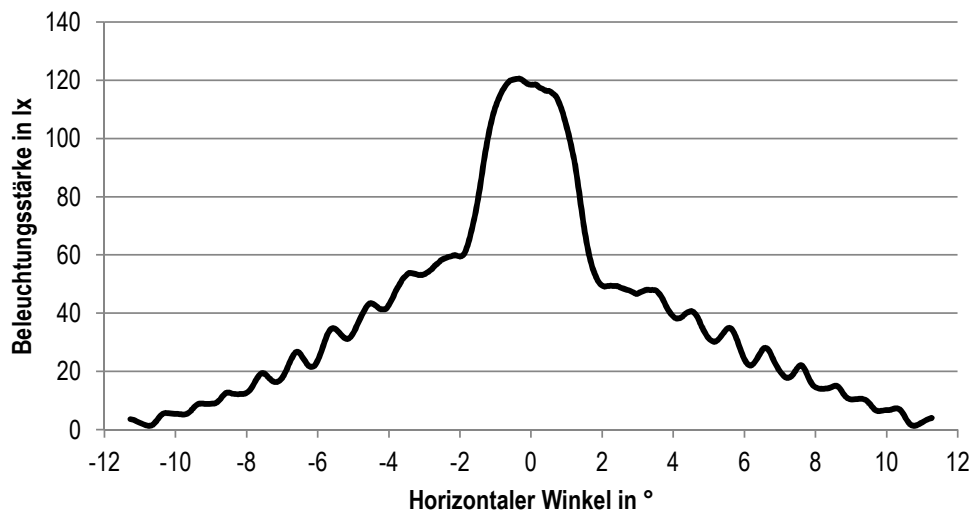


Abbildung 6.26: Horizontaler Schnitt durch die simulierte Lichtverteilung des Musters II

Die zweidimensionale Lichtverteilung in einer Entfernung von 25 m ist in Abbildung 6.25 dargestellt. In Abbildung 6.26 wird der horizontale Schnitt durch diese Lichtverteilung gezeigt, in dem sich die starke Bündelung des Lichts im Zentrum und die Breite Ausleuchtung der Randbereiche gut erkennen lässt. Der wellige Verlauf der Beleuchtungsstärke im Randbereich liegt an den einzelnen Facetten des Reflektors, die ein in horizontaler Richtung leicht inhomogenes Lichtbild erzeugen. Die geringfügige Abweichung von der Vertikalsymmetrie ist bedingt durch den nicht symmetrischen Einbau der Linse, so dass die Lichtverteilung auf der einen Seite stärker durch die Stege der Kunststoffoptik beeinflusst wird als auf der anderen Seite (vergleiche Abbildung 6.22).

6.4.3 Messergebnisse Lichtverteilung

In Abbildung 6.27 ist die gemessene Lichtverteilung des Scheinwerfermoduls dargestellt. Als Messsystem kommt das in Abschnitt 6.3.4 vorgestellte Goniometer *LMT GO-H 1400* zum Einsatz. Das Lasermodul wird ebenfalls ohne Abschlusscheibe vermessen, der Betriebsstrom der Laserdioden beträgt 600 mA. Die Messung findet bei Raumtemperatur statt.

Die maximale Beleuchtungsstärke beträgt 114,2 lx, was deutlich über dem Wert von 83,75 lx des ersten Musters liegt. Grund hierfür ist neben der Überarbeitung der Reflektorgeometrie die bessere thermische Anbindung des Leuchtstoffs, die gegenüber dem ersten Aufbau eine deutlich erhöhte Bestrahlungsstärke ermöglicht. Die seitlich aufgeweitete Lichtverteilung ist gegenüber der Horizontalen leicht geneigt, was auf die Positionierung des Prototypen während des Messvorgangs zurückzuführen ist.

Diese Messergebnisse stimmen gut mit den Simulationsergebnissen überein. So wird die leichte Asymmetrie der Lichtverteilung durch die Stege der Kunststofflinse sowohl in der Simulation als auch in der Messung sichtbar. Die Höhe des Beleuchtungsstärkenniveaus stimmt nicht überein,

da der reale Aufbau höhere Verluste zeigt beziehungsweise der Leuchtstoff einen geringeren Lichtstrom abgibt als angenommen. Außerdem ist die Emissionsleuchtdichte des Leuchtstoffs in der Realität nicht konstant sondern stark von der Position auf dem Konverter abhängig, was die Geometrie der Lichtverteilung ebenfalls gegenüber der Simulation verändert. Auch die direkte Reflexion von Laserlicht an der Leuchtstoffoberfläche wird in der Simulation nicht berücksichtigt.

Die Beleuchtungsstärke, die ein exemplarisch vermessener Xenonscheinwerfer eines *Porsche 911* Typ 991 erzeugt, liegt bei $85,3 \text{ lx}$ bei Fernlicht. Bei korrekter Justage der beiden Scheinwerfer ist damit eine Sichtweite von 163 m möglich. Als Kriterium für Sichtweite wird die Entfernung definiert, bei der ein senkrecht zum Lichteinfall orientiertes Objekt mit 4 lx beleuchtet wird. In Kombination mit dem für den Scheinwerfer vorgesehenen, konventionellen Halogen-Zusatzfernlicht (vergleiche Abschnitt 6.3.4) erhöht sich die Sichtweite um 27% auf 207 m . Das hier vorgestellte Lasermodul erhöht die Beleuchtungsstärke des Fahrzeugscheinwerfers im Hot Spot auf mehr als das Doppelte. Unter der Annahme, dass die Abschlusscheibe des Scheinwerfers die vom Modul erzeugte Beleuchtungsstärke um 12% herabsetzt, ergibt sich eine Sichtweite von 241 m , was einer Erhöhung von 48% gegenüber dem Xenon-Fernlicht ohne Zusatzfernlicht entspricht.

Die Breite der Lichtverteilung des Musters II beträgt $2,9^\circ$ bezogen auf die 40 lx -Linie. Dieser zentrale Bereich der Lichtverteilung wird sowohl durch Licht erzeugt, das vom Reflektor umgelenkt wird, als auch von solchem, das von der Linse gebrochen wird. Der Wert von $2,9^\circ$ liegt unterhalb dem des ersten Musters von $4,6^\circ$. Dafür wird das Licht stärker fokussiert und mit $114,2 \text{ lx}$ statt $83,8 \text{ lx}$ ein hellerer Hot Spot generiert. Der äußere Bereich der Lichtverteilung hingegen wird nur durch den Reflektor erzeugt, so dass ein hoher Gradient der Beleuchtungsstärke den mittleren Bereich der Lichtverteilung vom Randbereich trennt. Die 10 lx -Linie weist eine gegenüber dem ersten System deutlich gesteigerte Breite von $15,6^\circ$ auf (Muster I: $8,6^\circ$).

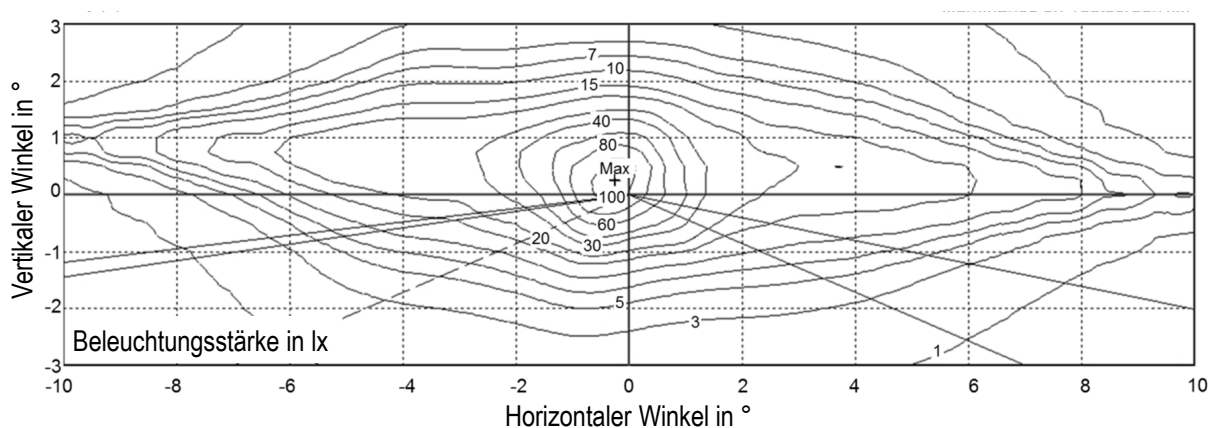


Abbildung 6.27: Lichtverteilung von Muster II nach [LACH14b]

6.4.4 Messergebnisse Lichtausbeute und Wirkungsgrad

Die Lichtausbeute des Lasermoduls ist in Abhängigkeit des Betriebsstroms der Dioden in Abbildung 6.28 dargestellt. Temperaturabhängig liegt die Laserschwelle der eingesetzten Dioden (*Osram PL-TB 450B*) bei etwa 200 mA , so dass unterhalb von diesem Wert keine nennenswerte Lichtausbeute erzielt werden kann. Die hier betrachtete Gehäusetemperatur der Dioden im Scheinwerfermodul wird mittels Thermoelement an einem Kontaktpin von einer der Dioden ermittelt und für alle vier Dioden als identisch angenommen.

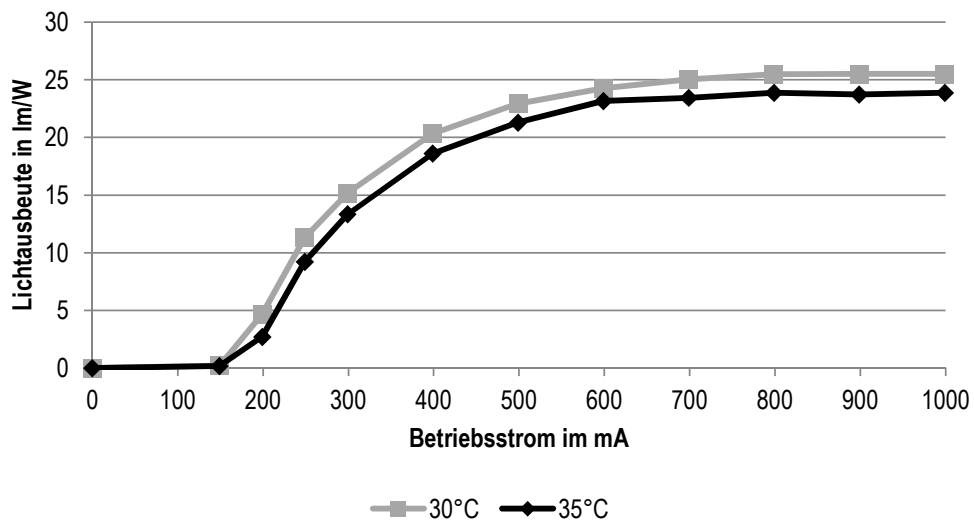


Abbildung 6.28: Lichtausbeute in Abhängigkeit des Betriebsstroms bei verschiedenen Gehäusetemperaturen der Dioden nach [GRAB15]

Mit steigendem Betriebsstrom der Dioden steigt der Wirkungsgrad der Laserdioden an (vergleiche Abbildung 6.1). Eine über den hier dargestellten Bereich hinausgehende Erhöhung des Betriebsstroms führt zunächst zu einem Rückgang des Wirkungsgrads und schließlich zum sogenannten *Rollover* der Dioden, einem Rückgang der Emission bei steigender Leistungsaufnahme. Die Lichtausbeute des Moduls und die optische Emission der Dioden sind so lange proportional zueinander, wie der Wirkungsgrad des eingesetzten Leuchtstoffs nicht aufgrund von Thermal Quenching einbricht.

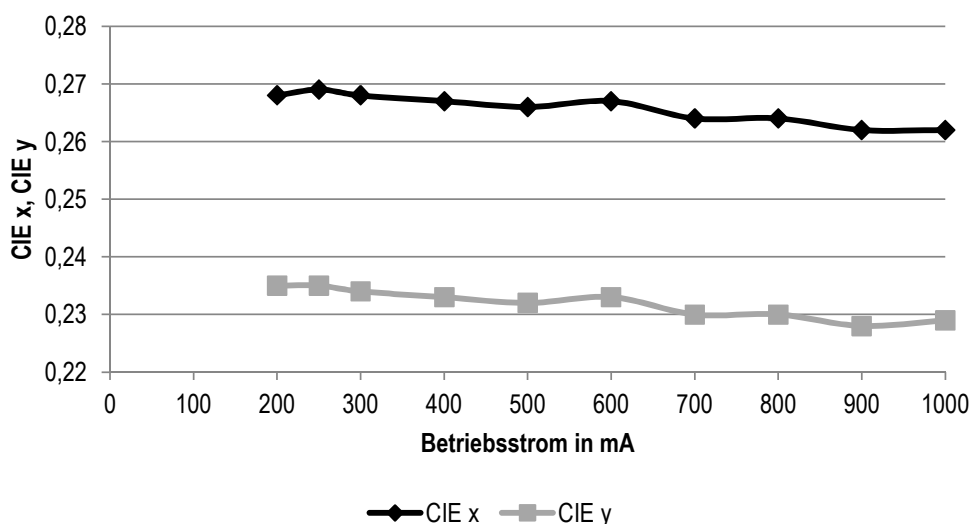
Bei einer Gehäusetemperatur der Dioden von 30°C geht die Lichtausbeute mit $25,5\text{ lm/W}$ bei einem Strom von 800 mA in die Sättigung (Abbildung 6.28). Eine Erhöhung der Temperatur um 5 K reduziert die Lichtausbeute und führt dazu, dass ebenfalls bei 800 mA der Sättigungswert von ungefähr $23,8\text{ lm/W}$ erreicht wird. Wird die Gehäusetemperatur weiter erhöht, setzt die Sättigung bereits bei geringeren Strömen ein. Für das Modul wird ein Soll-Betriebsstrom von 600 mA definiert. Bei diesem Wert ist gemäß Abschnitt 6.1.1 ein sicherer Betrieb der Laserdioden möglich, da zwischen der Gehäusetemperatur der Dioden und der Umgebung eine zur Abfuhr der Verlustleistung ausreichende Temperaturdifferenz vorhanden ist.

Die in Abbildung 6.28 dargestellte Lichtausbeute berücksichtigt nicht die zum Kühlen des Moduls benötigte Leistungsaufnahme des Lüfters in Höhe von $0,72\text{ W}$. In Tabelle 6.4 ist die Licht-

Tabelle 6.4: Lichtausbeute des Moduls in Abhängigkeit der Diodentemperatur nach [GRAB15]

Gehäusetemperatur Laserdioden in °C	30	35
Betriebsstrom in mA	600	600
Leistungsaufnahme Laserdioden in W	10,53	10,41
Leistungsaufnahme Lüfter in W	0,72	0,72
Lichtstrom in lm	255,5	241,0
Lichtausbeute ohne Lüfter in lm/W	24,27	23,16
Lichtausbeute mit Lüfter in lm/W	22,71	21,65

ausbeute des Systems mit und ohne Berücksichtigung dieser zusätzlichen Leistungsaufnahme bei einem Betriebsstrom von 600 mA gegenübergestellt. Bei einer Gehäusetemperatur der Dioden von 30 °C emittiert das Modul einen Lichtstrom von 255,5 lm, was einer Lichtausbeute von 22,71 lm/W unter Berücksichtigung der Kühlleistung entspricht. Bei einer Temperatur von 35 °C sinkt die Lichtausbeute um 4,7 % auf 21,65 lm/W.

Abbildung 6.29: Integral gemessener Farbort in Abhängigkeit des Betriebsstroms bei $T_C = 35^\circ\text{C}$ nach [GRAB15]

Der Farbort, den das Modul integral betrachtet abstrahlt, ist ebenfalls von den Betriebsbedingungen abhängig (vergleiche Abbildung 6.29). Der Emission bei einem Strom von 150 mA kann aufgrund der Messgenauigkeit kein Farbort zugeordnet werden, so dass dieser Punkt in Abbildung 6.29 nicht dargestellt ist. Mit steigendem Betriebsstrom nimmt der Blauanteil der Lichtemission geringfügig zu, was die dargestellte Abnahme der CIE x- und CIE y-Werte bewirkt. Analog dazu steigt die emittierte Farbtemperatur an. Ursache hierfür ist eine Abnahme des Wirkungsgrads des Leuchtstoffs, der bei Erhöhung der Bestrahlungsdichte ein Einsetzen des Thermal Quenchings zeigt.

In Abbildung 6.30 ist der integral gemessene Farbort, den das Laserlichtmodul bei $I = 600\text{ mA}$ und $T_C = 35^\circ\text{C}$ emittiert, im Vergleich zum ECE-Weiß nach Regelung 48 eingetragen. Außer-

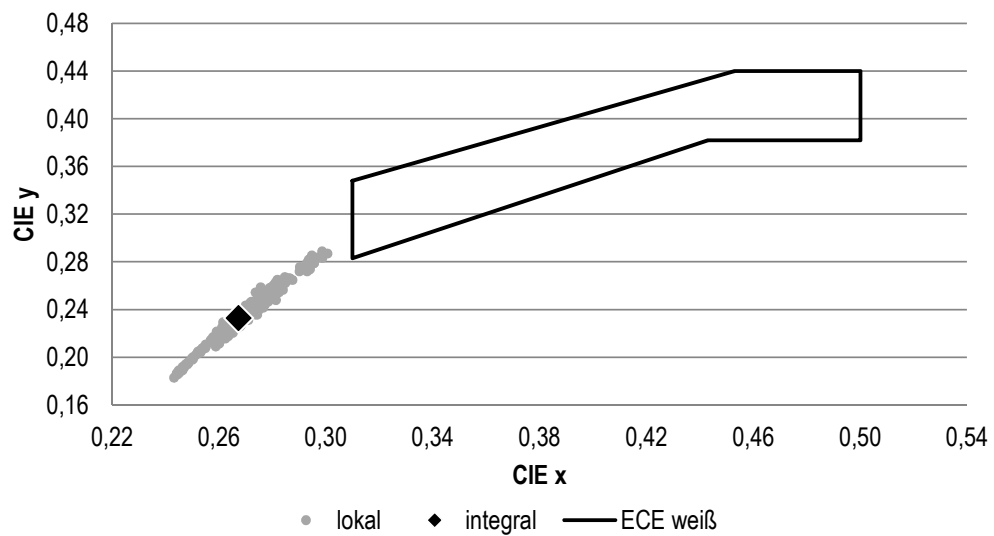


Abbildung 6.30: Integral und winkelaufgelöst gemessener Farbort im Vergleich zum ECE-Weiß nach [GRAB15]

dem sind in der Abbildung die lokalen, winkelaufgelöst gemessenen Farborte aufgeführt. Diese Messung erfolgt auf einem Goniophotometer des Typs *GO-H 1400* von *LMT* mit einem Farbmesskopf in *3,16 m* Entfernung vom Prüfling bei Raumtemperatur. Der Farbort des Prüflings ist stark vom Abstrahlwinkel abhängig. Die Region nahe des Hot Spots weist eine verhältnismäßig geringe Farbtemperatur auf, wohingegen sich links und rechts davon zwei Stellen mit sehr hohem Blauanteil befinden. Alle erfassten Farborte weisen geringe *CIE x*- und *y*-Werte auf und liegen außerhalb des von der ECE als weiß definierten Bereichs.

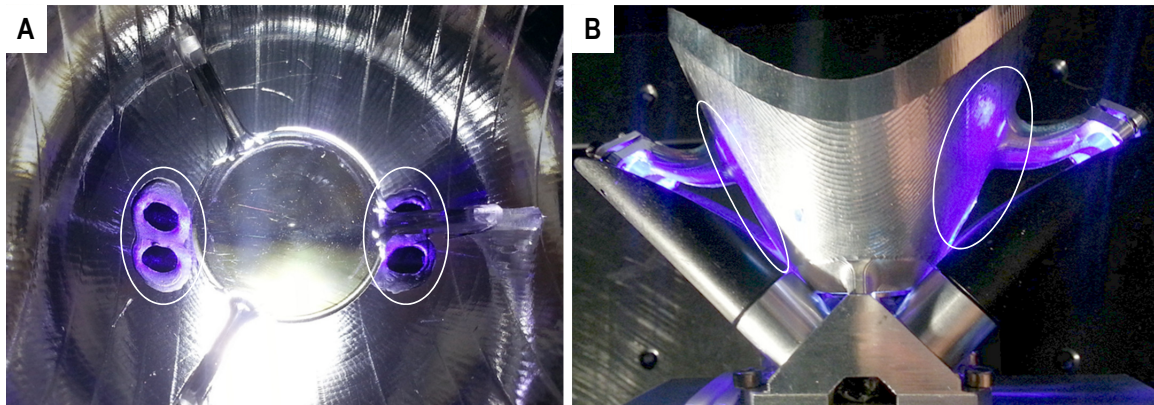


Abbildung 6.31: Unerwünschte Reflexionen von Laserlicht nach [GRAB15]

A) neben den Eintrittsbohrungen, B) an der Außenseite des Reflektors

An der Oberfläche des eingesetzten Leuchtstoffs werden etwa 10 % des einfallenden Lichts reflektiert (vergleiche Abbildung 4.8, in der ein vergleichbarer Leuchtstoff dargestellt ist). In Abhängigkeit der Oberflächenrauheit ist diese Reflexion mehr oder weniger stark gerichtet. Alle im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Leuchtstoffe weisen nahezu glatte Oberflächen auf, was eine stark gerichtete Reflexion des Laserlichts bewirkt. Durch den symmetrischen Aufbau des Moduls tritt der größte Teil des reflektierten Lichts durch die der betrachteten Laserdi-

ode gegenüberliegende Eintrittsbohrung wieder aus dem System aus. Ein geringer Teil jedoch gelangt auf die benachbarte Reflektorfläche und wird von dieser auf die Straße umgelenkt. Zur Reduktion dieser unerwünschten Reflexion sind die Bereiche um die Eintrittsbohrungen des Reflektors geschwärzt, siehe Abbildung 6.31 A. Trotz dieser Maßnahmen wird ein geringer Teil des vom Leuchtstoff reflektierten blauen Lichts vom Reflektor so umgelenkt, dass unter horizontalen Winkeln von etwa $\pm 6^\circ$ Licht mit einem sehr hohen Blauanteil abgestrahlt wird.

In Abbildung 6.32 werden die verschiedenen Verluste, die im Laserlichtmodul auftreten, beziffert. Die elektrische Eingangsleistung beträgt in dem dargestellten Versuch 10,43 W, wobei die Kühlleistung nicht berücksichtigt wird. Das Modul emittiert 0,91 W optische Nutzleistung. Die Werte *Eingangsleistung*, *Leistung nach Kollimation*, *Leistung auf dem Leuchtstoff* und *Nutzleistung* sind direkte Messergebnisse. Alle übrigen Messwerte basieren auf diesen Ergebnissen und berücksichtigen die gesondert vermessenen Wirkungsgrade der im Strahlengang befindlichen Komponenten. Für die vollständige Versuchsbeschreibung sei auf [GRAB15] verwiesen.

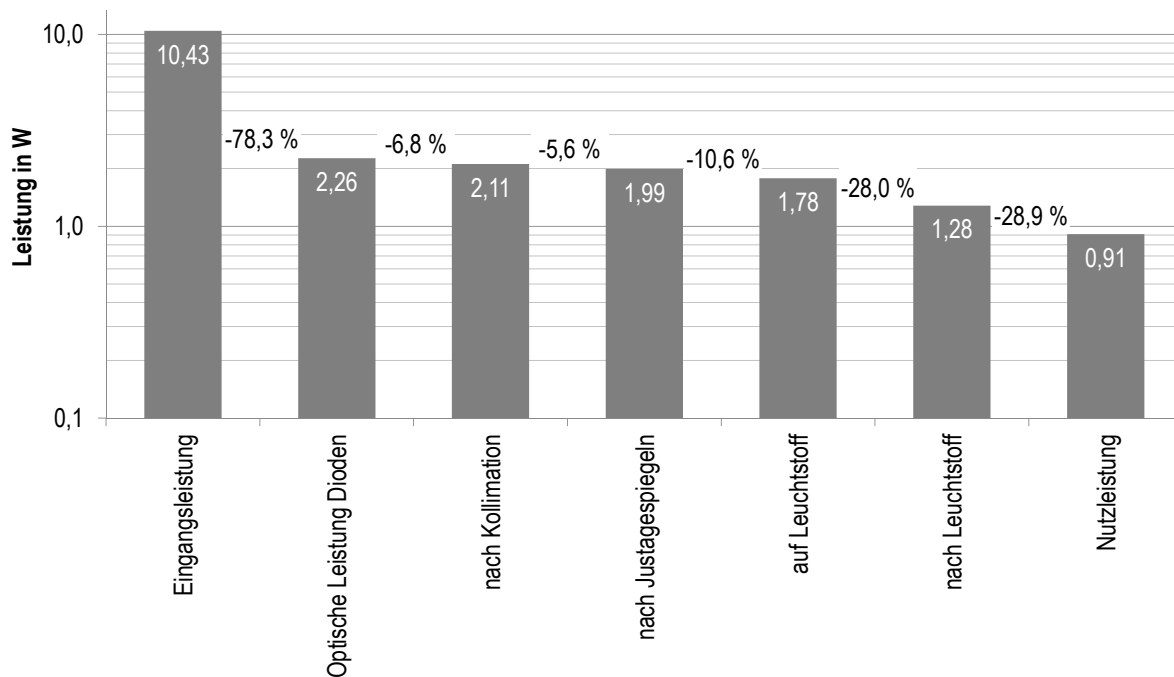


Abbildung 6.32: Wirkungsgrad und Verluste bei $I = 600 \text{ mA}$ und $T_C = 30^\circ \text{C}$ nach [GRAB15]

Das Gesamtsystem Laserscheinwerfer hat einen Wirkungsgrad von 8,7 %. Dieser Wert wird hauptsächlich durch die Verluste der vier Laserdioden in Höhe von insgesamt 8,17 W beziehungsweise 78,3 % bestimmt.

Bei den betrachteten Betriebsparametern von 30°C Gehäusetemperatur und 600 mA Betriebsstrom weisen die eingesetzten Halbleiterlichtquellen einen Wirkungsgrad vom 21,7 % auf. Jede Laserdiode erzeugt aus im Mittel 2,61 W elektrischer Eingangsleistung 0,57 W Strahlungsleistung, wobei die Verlustleistung in Höhe von jeweils $P_{V,D} = 2,04 \text{ W}$ zu einer Erwärmung der Diode führt. Der thermische Widerstand zwischen Gehäuse und Sperrschicht der Diode beträgt bei der in Abbildung 6.24 dargestellten Kontaktierung etwa $R_{th,JC} = 16,0 \text{ K/W}$. Die Diode ist mittels Wärmeleitpaste mit dem Montageblock kontaktiert, deren thermischer Wi-

derstand etwa $R_{th,CM} = 1,0 \text{ K/W}$ beträgt. Somit führt die Verlustleistung der Diode zu einer Temperaturdifferenz zwischen Sperrschicht der Diode und Montageblock in Höhe von

$$\Delta T = P_{V,D} (R_{th,JC} + R_{th,CM}) = 34,68 \text{ K}. \quad (6.8)$$

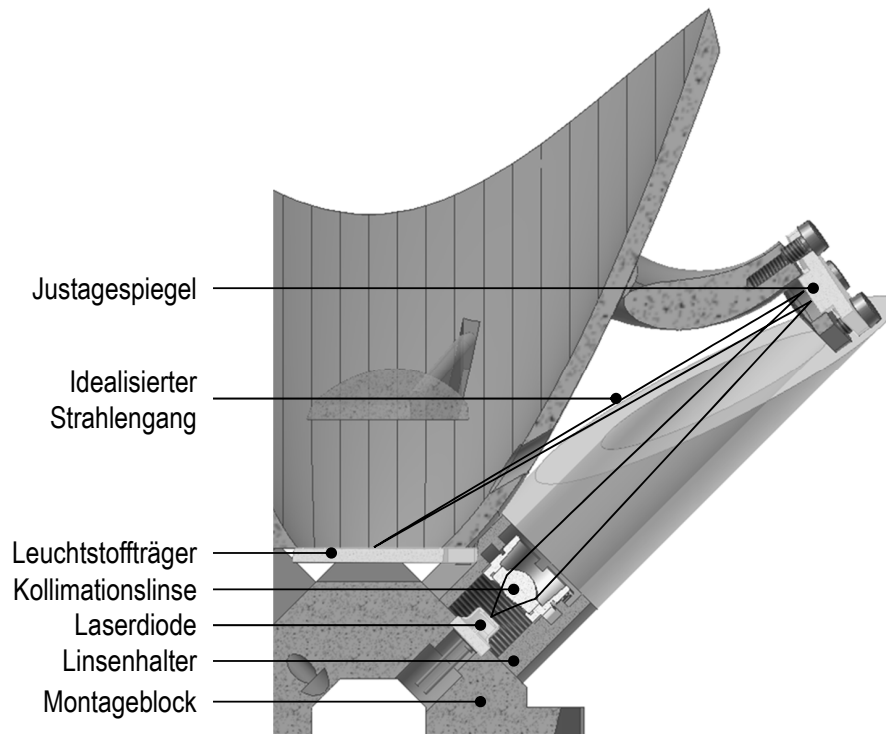


Abbildung 6.33: Schnittansicht des Moduls mit Strahlengang einer Laserdiode über den Justagespiegel bis zum Emissionspunkt auf dem Leuchtstoff

Die Gehäusetemperatur von $T_C = 30^\circ \text{C}$ entspricht in guter Näherung der Temperatur des Montageblocks, so dass die Sperrschicht der Laserdiode eine Temperatur T_J von

$$T_J \approx T_C + \Delta T \approx 65^\circ \text{C} \quad (6.9)$$

aufweist. Die Kollimationslinse zum Fokussieren der Dioden verursacht einen Verlust in Höhe von 6,8%, so dass mit vier Dioden 2,26 W kollimierter optischer Leistung zur Verfügung stehen. Die Justagespiegel lenken das eingestrahlte Licht mit einem Wirkungsgrad von 94,9% um. Dieser Wert liegt leicht unterhalb dem vom Hersteller der Spiegel angegebenen Wirkungsgrad von etwa 98% [EDMU16]. Ursache hierfür können leichte Verschmutzungen der Spiegel sein, da sich das Modul vor der Messung bereits einige Zeit im Gebrauch befunden hat.

Ein Teil des emittierten Lichts verfehlt die Eintrittsöffnungen am Reflektor beziehungsweise die Justagespiegel. Diese Streulichtverluste in Höhe von 10,6% werden an der Außenseite des Scheinwerfermoduls reflektiert. Die Verluste der einzelnen Dioden unterscheiden sich stark voneinander und schwanken im Bereich von 7,2% bis 16,2%. Der mechanische Aufbau des Moduls erlaubt keine Justage des kollimierten Laserstrahls zwischen Diode und Justagespiegel.

Lediglich eine geringfügige Korrektur der Abstrahlrichtung ist durch das Ausnutzen der Spielpassungen möglich, welche zur Befestigung der Linsenhalter am Montageblock vorgesehen sind (vergleiche Abbildung 6.33). Diese Korrekturmöglichkeit reicht jedoch nicht aus, um alle vier Dioden optimal auf den jeweiligen Justagespiegel auszurichten. Demzufolge treten bei einzelnen Dioden erhöhte Streulichtverluste auf. Des Weiteren kann der Laserstrahl, wenn er den Justagespiegel zu weit außerhalb der Mitte trifft, nicht vollständig durch die Eintrittsbohrung des Reflektors auf den Leuchtstoff gelenkt werden, so dass auch an dieser Stelle erhöhte Streuverluste auftreten. In Abbildung 6.31 B sind diese visuell sichtbaren Verluste an der Außenseite des Reflektors dargestellt. In der Praxis muss das Streulicht im Sinne der Lasersicherheit durch geeignete Absorber am Austritt aus dem Modul gehindert werden.

Von den 1,78 W Laserleistung, welche den Leuchtstoff erreichen, werden 1,28 W als weißes Licht emittiert, die übrigen 0,50 W erwärmen den Leuchtstoff. Das optische System, bestehend aus Reflektor und Linse zur Formung der Lichtverteilung, weist einen Wirkungsgrad von 71,1 % auf. Für die Integration in einen Fahrzeugscheinwerfer muss darüber hinaus der Transmissionsgrad der Abschlusscheibe berücksichtigt werden, der hier nicht näher betrachtet wird.

Die folgenden vier Punkte bieten das größte Potential, um den Wirkungsgrad des Laserscheinwerfers zu verbessern:

- Das höchste Optimierungspotential weisen die Laserdioden auf, welche den größten Anteil an der Verlustleistung des Systems haben.
- Der Einsatz eines thermisch stabileren keramischen Leuchtstoffs kann den Wirkungsgrad an dieser Stelle verbessern.
- Ein überarbeiteter Modulaufbau mit verbesserten mechanischen Einstellmöglichkeiten reduziert den Streulichtverlust des Systems.
- Der Wirkungsgrad des optischen Systems (Reflektor und Linse) liegt unter dem erwarteten Wert von etwa 90 %. Eine korrosionshemmende Beschichtung des Aluminiumreflektors macht für den Musterbau Sinn, während für die Serienfertigung üblicherweise beschichtete Kunststoffe eingesetzt werden.

6.4.5 Optimierungspotential

Bedingt durch die zum Zeitpunkt des Musterbaus zur Verfügung stehenden Leuchtstoffe ist die Farbtemperatur, die dieser Musterscheinwerfer abstrahlt, für den Einsatz im Kraftfahrzeug ungeeignet. Je steiler das Laserlicht auf den hier genutzten Leuchtstoff trifft, desto stärker nähert sich der erzeugte Farbort dem ECE-Weiß an (vergleiche [GRAB15]). Allerdings kann mit dem hier beschriebenen Ansatz der Frontprojektion kein Winkel realisiert werden, bei dem der Leuchtstoff einen geeigneten Farbort abstrahlt.

Die Positionierung der Laserdioden und Kollimationslinsen weist zueinander eine zu große Toleranz auf. Deshalb treffen signifikante Teile des von den Dioden emittierten Lichts nicht auf die

Justagespiegel sondern auf deren Halter. Hier ist entweder ein größerer Umlenkspiegel notwendig, wodurch die Lichteintrittsöffnung in der Seitenwand des Reflektors ebenfalls vergrößert werden müsste, eine präzisere Ausrichtung der Kollimationsoptiken oder eine Verkürzung des Strahlengangs zwischen Kollimationsoptik und Justagespiegel.

Die vier Laserdioden sind in einem kompakten Aluminiumblock montiert, wodurch sie sich gegenseitig aufheizen. Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Halbleiterlichtquellen ist ratsam. Empfehlenswert ist darüber hinaus eine Reduktion der Systemkomplexität, was vor allem die Anzahl der zueinander zu justierenden Komponenten betrifft.

6.5 Muster III

Die durch das Muster II gewonnenen Erkenntnisse werden zur Auslegung eines weiteren Musters genutzt, welches im Rahmen dieser Arbeit bis zur prototypischen Fertigstellung betrachtet wird. Der Einbauort entspricht dem des Musters II. Auch dieses Laserzusatzfernlicht wird für den Bauraum des Halogen-Zusatzfernlichts eines *Porsche 911*-Scheinwerfers vom Typ 991 ausgelegt. Im Gegensatz zu den beiden anderen Prototypen kommt in diesem Muster ein nicht-rotationssymmetrischer, facettierter Paraboloidreflektor entsprechend Konzept C aus Abschnitt 5.2.5 zum Einsatz (vergleiche Abbildung 6.34). Dieses alternative Konzept ermöglicht durch den Verzicht auf die zusätzliche Linse einen einfacheren Systembau, wodurch die Justage der Linse relativ zum Reflektor entfällt. Allerdings müssen Einbußen im Wirkungsgrad in Kauf genommen werden, da mit dieser Reflektorgeometrie nicht alles Licht erfasst und umgelenkt werden kann.

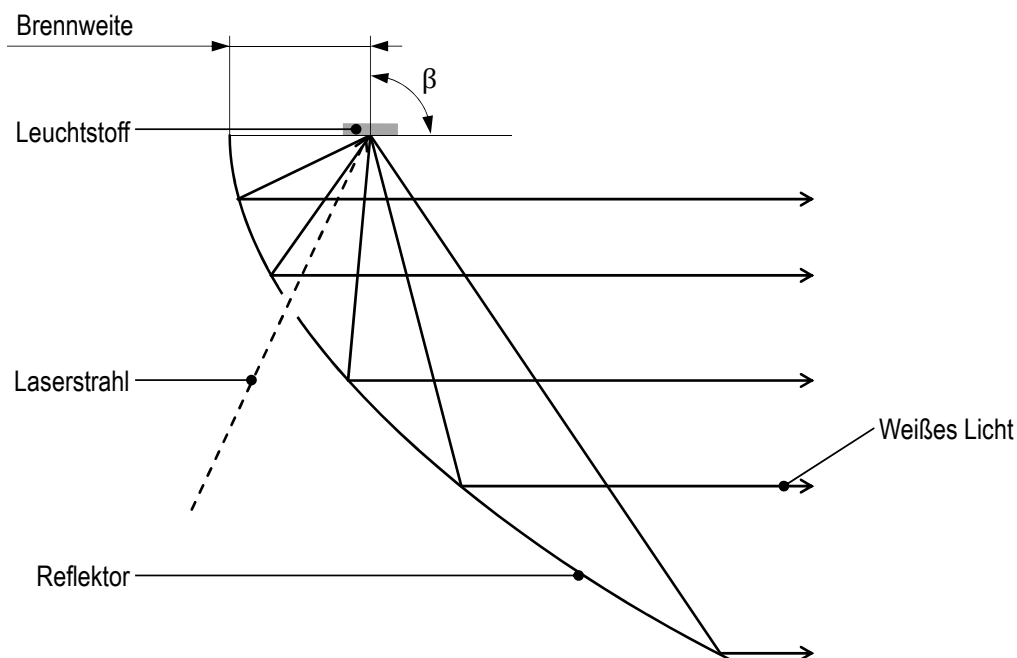


Abbildung 6.34: Optisches Konzept des Musters III, nach [MARX15], [KLOP16a]

6.5.1 Ausarbeitung des Moduls

Ein primäres Ziel, das mit diesem System erreicht werden soll, ist das Erzeugen einer hohen Beleuchtungsstärke im Hot Spot, welche an der Grenze des gesetzlichen Höchstwerts von 344 lx in einer Entfernung von 25 m liegt. Da der Lichtstrom, welcher mit in diesem Fall drei Laserdioden auf Basis von Frequenzkonversion erzeugt werden kann, begrenzt ist, müssen Abstriche in der horizontalen Ausdehnung der Lichtverteilung in Kauf genommen werden.

Die lichttechnische Auslegung dieses in Abbildung 6.34 dargestellten asymmetrischen Reflektors basiert auf den Simulationen aus Abschnitt 5.3.8, in denen der von einem nicht facettierten Reflektor umgelenkte Lichtstrom und die von ihm erzielte Beleuchtungsstärke betrachtet werden. Der Neigungswinkel der Emissionsfläche von $\beta = 90^\circ$ wird aus diesen Berechnungen übernommen, da dieser Wert gute lichttechnische Ergebnisse mit einer hervorragenden Handhabbarkeit in der Fertigung verbindet. Beim Einsatz im Kraftfahrzeug soll jedoch, anders als in Abschnitt 5.3.8 betrachtet, keine auf HV konzentrierte, sondern eine in horizontaler Richtung leicht ausgedehnte Lichtverteilung erzeugt werden, wozu der Reflektor facettiert wird. Diese Umverteilung des Lichtstroms führt zu einer Abnahme von E_{max} . Diese ist notwendig, da das Simulationsergebnis mit $E_{max} = 1020 \text{ lx}$ deutlich über dem nach ECE-Richtlinie 113 gesetzlich erlaubten Höchstwert von 344 lx liegt.

In der Praxis muss außerdem berücksichtigt werden, dass sich die Beleuchtungsstärke von konventionellem Fernlicht und Zusatzfernlicht überlagern und das Lasermodul deswegen den Grenzwert von 344 lx nicht komplett ausreizen darf. Anhand dieses Musters III soll jedoch gezeigt, werden, dass sich der vorgeschriebene Grenzwert der Beleuchtungsstärke mit einem kompakten und optisch ansprechenden Laserscheinwerfer erreichen lässt.

Tabelle 6.5: Facettierung des Reflektors

Facette Nr.	0	± 1	± 2
Brennweite f_p in mm	8,0	8,0	8,0
Emissionswinkel ε in $^\circ$	0,00	$\pm 0,25$	$\pm 0,50$

Um das Niveau der Beleuchtungsstärke auf den erlaubten Wert zu senken kann auch, anstatt die Lichtverteilung zu verbreitern, der Bauraum des Moduls verringert werden. Beide Optionen stellen einen Zielkonflikt dar, den es optimal zu lösen gilt. In einem ersten Schritt wird der Emissionswinkel ε der Facetten des Reflektors mit $-0,5^\circ < \varepsilon < 0,5^\circ$ festgelegt (vergleiche Tabelle 6.5). Um diesen Winkelbereich gleichmäßig auszuleuchten wird der Reflektor mit fünf Facetten versehen. Diese im Vergleich zu den vorangegangenen Mustern stark reduzierte Segmentanzahl ist möglich, da die Lichtverteilung horizontal stärker begrenzt ist. Anschließend wird das System so weit skaliert, dass die erzeugte maximale Beleuchtungsstärke dem gesetzlichen Grenzwert entspricht. Der resultierende Skalierungsfaktor beträgt 0,8, wodurch sich die Breite des Systems zu 36 mm ergibt. Unter Berücksichtigung der notwendigen Wandstärke des Reflektors wird die Höhe ebenfalls auf 36 mm festgesetzt, für die Länge ergibt sich ein Wert von $47,71 \text{ mm}$. Der Reflektor besteht aus fünf $7,2 \text{ mm}$ breiten Facetten, die jeweils eine Brennweite

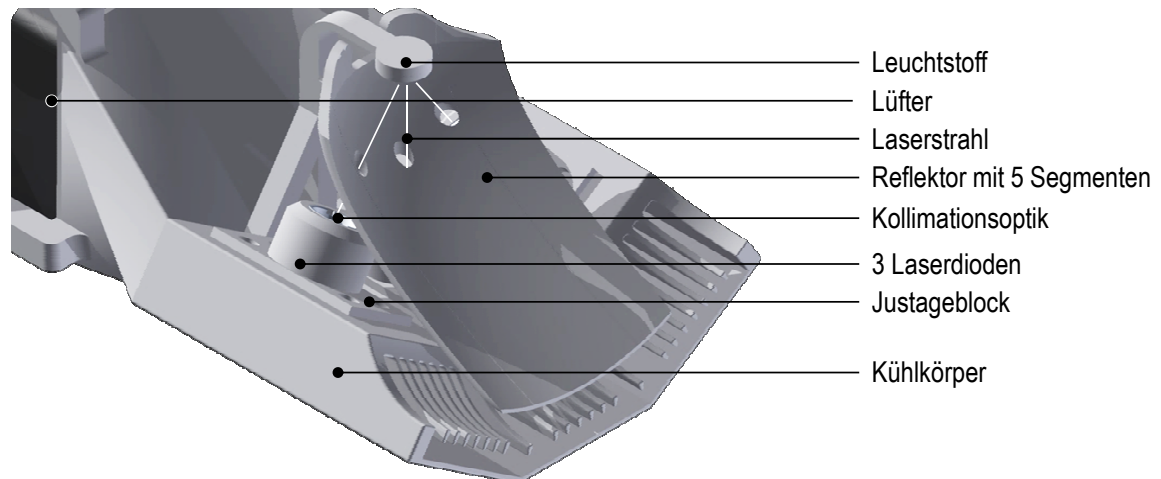


Abbildung 6.35: CAD-Modell des Musters III

von $f = 8,0 \text{ mm}$ aufweisen. Bei Muster II ist eine individuelle Anpassung der Brennweiten der einzelnen Facetten notwendig, um die Übergänge der Segmente möglichst stufenlos zu gestalten. Dadurch, dass die Emissionswinkel bei Muster III nur in einem engen Bereich zwischen $-0,5^\circ$ und $+0,5^\circ$ variieren, kann hier auf eine Brennweitenanpassung verzichtet werden.

Der Reflektor öffnet sich aus ästhetischen Gründen nach oben, so dass der Kühlkörper, wie in Abbildung 6.35 dargestellt, unterhalb des Reflektors positioniert wird. Der Betrachter kann somit direkt auf die optisch ansprechende Reflexionsfläche blicken.

Anstatt die Laserdioden fest zu montieren und die Richtung der Lichtemission über zusätzliche Justagespiegel zu beeinflussen werden die Dioden einschließlich der jeweiligen Kollimationslinse in einzelnen Justagemodulen montiert. Diese lassen sich durch Verschieben auf dem Kühlkörper positionieren, so dass die Laserstrahlen zueinander und in Relation zum Leuchtstoff eingestellt werden können. Die planen Kontaktflächen zwischen den Justagemodulen und dem Kühlkörper werden mit Wärmeleitpaste versehen. Die Anzahl der Dioden wird von vier auf drei reduziert und die Dioden im Vergleich zum vorherigen Muster II mit vergrößertem Abstand zueinander positioniert, was das gegenseitige Aufheizen der Halbleiterlichtquellen reduziert.

Aus Mangel an Alternativen wird für den Musteraufbau der gleiche Leuchtstoff eingesetzt, der im zuvor präsentierten Muster II genutzt wird. Die Strahlung einer Laserdiode trifft nun jedoch senkrecht, die der beiden anderen Dioden um jeweils $33,5^\circ$ gegenüber der Normalen geneigt auf den Leuchtstoff (vergleiche Abbildung 6.35). Diese gegenüber dem Muster II deutlich steileren Auftreffwinkel reduzieren nach Grabe die von diesem Leuchtstoff emittierte Farbtemperatur [GRAB15]. Der Kühlkörper wird aus Aluminium lasergesintert, was enorme Freiheitsgrade in der Gestaltung dieses Bauteils ermöglicht. Die Möglichkeiten der Optimierung des Kühlsystems auf thermodynamischer Ebene können jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden. Prinzipiell lassen sich auch Reflektoren im Metall-Lasersinterverfahren herstellen. Allerdings liegen die bislang erzielten Reflexionsgrade deutlich unterhalb derer von konventionell gefertigten Bauteilen [LACH15a], [LACH15b], [KLOP16a].

6.5.2 Ergebnisse

Entsprechend der Simulation aus Abschnitt 5.3.8 wird davon ausgegangen, dass die drei Laserdioden den Leuchtstoff zu einer Abstrahlung von 200 lm anregen. Außerdem wird angenommen, dass der vom Reflektor umgelenkte Lichtstrom durch den endlichen Reflexionsgrad des Materials und die Abschlusscheibe des Scheinwerfers einen Verlust in Höhe von insgesamt 20 % erfährt. Diese Annahmen lassen sich in der Simulation auf einfache Weise durch einen auf 160 lm reduzierten Lichtstrom zusammenfassen.

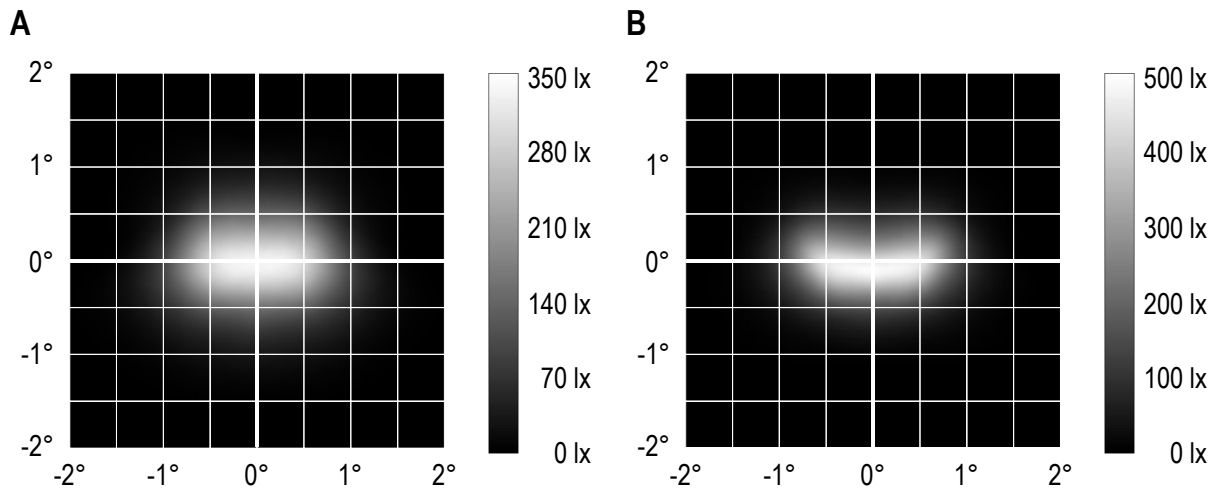


Abbildung 6.36: Simulation der Lichtverteilung von Muster III,
A) quadratische Emissionsfläche, B) kleinere rechteckige Emissionsfläche

Das in Abbildung 6.36 A dargestellte Simulationsergebnis der Lichtverteilung basiert auf der in Abschnitt 5.3.8 getroffenen Annahme einer quadratischen Lichtemissionsfläche von $0,4 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm}$. Diese Größe der Lichtemissionsfläche liegt deutlich unter den Annahmen für Muster I und II, befindet aber in einem Bereich, der mit keramischen Leuchtstoffen realisiert werden kann (vergleiche *Osram μ LARP* in Tabelle 3.1). Damit soll das Potential von Laserscheinwerfern aufgezeigt werden, ohne im Rahmen dieser Arbeit an die praktische Verfügbarkeit geeigneter Leuchtstoffe gebunden zu sein.

Bedingt durch die begrenzte Größe des Reflektors und die drei für die Laserstrahlen benötigten Bohrungen lenkt der Reflektor nur 78,9 % des von der Lichtquelle abgestrahlten Lichtstroms um. Die im Hot Spot erzielte Beleuchtungsstärke liegt mit $337,1 \text{ lx}$ unmittelbar unterhalb des gesetzlichen Maximums. In horizontaler Richtung bleibt die Beleuchtungsstärke zunächst näherungsweise konstant und beträgt 290 lx bei $\pm 0,5^\circ$ (vergleiche Abbildung 6.37). Bei größeren Abstrahlwinkeln nimmt sie vergleichsweise schnell ab und beträgt 40 lx bei einem Winkel von $\pm 1,2^\circ$ und 10 lx bei $\pm 1,5^\circ$.

Die erzeugte Lichtverteilung ist stark von der tatsächlichen Geometrie der lichtabstrahlenden Fläche des Leuchtstoffs abhängig. Wird statt der quadratischen Fläche eine rechteckige mit Kantenlängen von $0,4 \text{ mm}$ und $0,2 \text{ mm}$ angenommen, so ergibt sich die in Abbildungsteil B dargestellte Lichtverteilung. Dabei wird die Emissionsfläche so ausgerichtet, dass sie

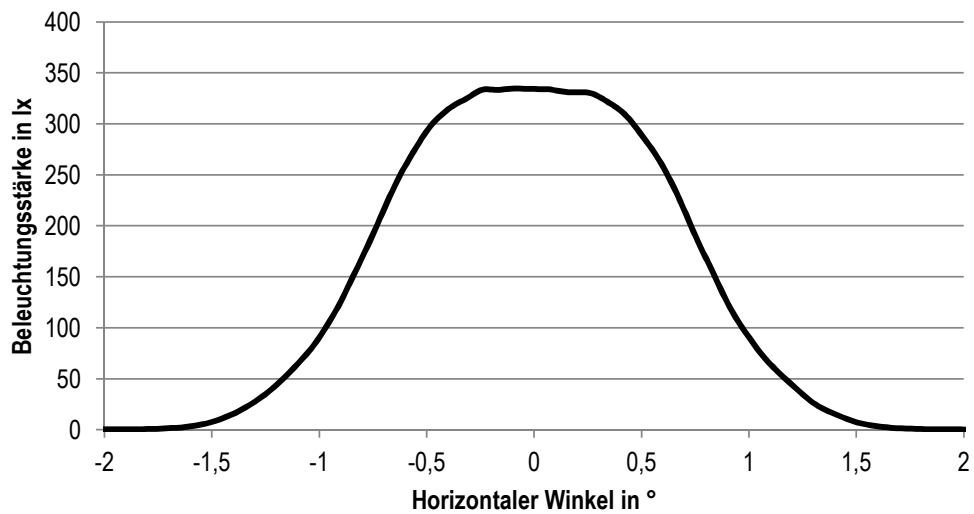


Abbildung 6.37: Horizontaler Schnitt durch die simulierte Lichtverteilung des Musters III mit einer Lichtemissionsfläche von $0,4 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm}$

sich in Richtung der optischen Achse des Scheinwerfers weniger weit erstreckt als senkrecht dazu, so dass eine vertikal begrenzte Lichtverteilung erzeugt wird, deren maximale Beleuchtungsstärke den zulässigen Höchstwert überschreitet. Analog dazu hat jede Vergrößerung der lichtabstrahlenden Fläche eine Abnahme der Beleuchtungsstärke in HV und eine Vergrößerung des Abstrahlwinkels zur Folge.

In Abbildung 6.38 ist ein Foto des am Institut gefertigten Fernlichtmoduls dargestellt, welches in einen *Porsche 911er* Scheinwerfer integriert ist.



Abbildung 6.38: Foto des Musters III, in Fahrzeugscheinwerfer integriert

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Der Einsatz von Laserlichtquellen in Scheinwerfern ermöglicht die Gestaltung besonders kompakter und aus designtechnischer Sicht attraktiver optischer Systeme. Die geringe Étendue und hohe Emissionsleuchtdichte der Lichtquelle ermöglicht es, unter Einhaltung gesetzlicher Anforderungen, wie beispielsweise einer scharfen Hell-Dunkel-Grenze, die Größe der Lichtaustrittsfläche eines Fahrzeugscheinwerfers signifikant zu verringern. Auf der anderen Seite sind mit diesem Ansatz Lichtfunktionen realisierbar, welche auf andere Arten nicht praktikabel umgesetzt werden können. Als Beispiel hierfür wird im Rahmen dieser Arbeit ein Zusatzfernlicht aufgebaut, dessen primäres Ziel das Erzeugen einer hohen Lichtstärke ist. Diese Module werden eingesetzt, um die Sichtweite nachts bei schnellen Geradeausfahrten zu erhöhen.

Das Beispiel eines Zusatzfernlichts eignet sich sehr gut als Demonstrator für den Einsatz laserbasierter Lichtquellen, da die hohen Lichtstärken, die ein solches System erzeugen soll, beim Einsatz von LEDs oder Halogenlampen vergleichsweise große optische Komponenten erfordern. Dieses vergleichsweise einfache System ist sehr gut geeignet, um die thermischen Eigenschaften von Laserdioden und Leuchtstoffen zu betrachten.

Laserdioden bieten als Lichtquellen für die Beleuchtungstechnik ein großes Potential, da sie eine kleine Étendue mit hohen verfügbaren Leistungen bei kompaktem Bauraum kombinieren. Im Vergleich zu anderen Laserlichtquellen, deren Étendue noch deutlich geringer ist, weisen Halbleiterlaser ein sehr gutes Preis-Lichtstrom-Verhältnis auf und sind deswegen für den Einsatz in Massenprodukten geeignet.

Drei prinzipielle Ansätze, um mit quasimonochromatischer Laserstrahlung weißes Licht zu erzeugen, werden betrachtet:

- Überlagerung des Lichts verschiedenfarbiger Dioden, beispielsweise RGB
- Konversion von ultraviolettem Laserlicht mittels Leuchtstoffen zu weißem Licht
- Konversion von blauem Laserlicht zu gelbem Licht, Mischung aus nicht umgewandeltem blauen und konvertiertem gelben Licht zur Erzeugung von weißem Lichts

Von diesen drei Lösungen wird die Konversion von blauem Licht weiter verfolgt, da die hierfür benötigten Leuchtstoffe prinzipiell verfügbar und vergleichsweise temperaturbeständig sind. Vor

allem können keramische Leuchtstoffe, die ansonsten bei weißen Hochleistungs-LEDs zum Einsatz kommen, genutzt werden. Dieses ist nicht nur im Hinblick auf die thermische Stabilität des Konverters von Vorteil, auch die anhand des Farbwiedergabeindex bestimmte spektrale Qualität der Lichtemission ist seit langer Zeit Gegenstand der Optimierung von LED-Leuchtstoffen, wovon auch laserbasierte Weißlichtquellen profitieren. Die Strahldichten, welche Laserdioden auf den Leuchtstoffen erzeugen, liegen jedoch deutlich über denen bei LED-Anwendungen. Deshalb werden in dieser Arbeit besonders die thermischen Effekte im Leuchtstoffen wie das wirkungsgradreduzierende Thermal Quenching und die temperaturabhängige Veränderung des emittierten Farborts betrachtet. Der maximale Betriebsstrom, der sich für die eingesetzten blauen Laserdioden bei Langzeitbetrieb im Fahrzeugscheinwerfer empfiehlt, wird hergeleitet.

Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit befasst sich mit der Konzeptionierung von Reflektorsystemen zur Erzeugung hoher Lichtstärken. Gleichzeitig sollen diese Systeme möglichst viel des von der weißen Laserlichtquelle emittierten Lichts umlenken. Die Vielzahl möglicher Lösungen wird durch die Forderung eingegrenzt, dass jeder Lichtstrahl nur eine zu bearbeitende optische Fläche passieren soll, um optische Verluste und die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen zu minimieren. Hierdurch können die Anforderungen an die Fertigungspräzision reduziert werden, wodurch ein Prototypenbau am Institut möglich ist. Ein morphologischer Kasten wird erarbeitet, mit dem Laserscheinwerfer für unterschiedliche Anforderungen konzipiert werden können. Drei Reflektorkonzepte, die alle auf Rotationsparaboloiden basieren, werden ausgewählt und eingehend betrachtet:

- Frontprojektion
- Rückprojektion
- Nicht-rotationssymmetrischer Reflektor

Unter der Annahme, dass es sich bei der Lichtquelle um einen punktförmigen Lambertstrahler handelt, wird der Wirkungsgrad der rotationssymmetrischen Reflektoren bestimmt. Der Zielkonflikt zwischen einer möglichst scharfen Abbildung der Lichtquelle, einem kompakten optischen System und einem hohen Umlenkwirkungsgrad wird hergeleitet und gelöst. Für die beiden rotationssymmetrischen Konzepte kommen hierbei analytische Betrachtungen zum Einsatz, wohingegen für das nicht-rotationssymmetrische System auf Simulationen zurückgegriffen wird.

Basierend auf den Grundlagen der geometrischen Optik werden die Größen der Wendebilder hergeleitet, die an unterschiedlichen Stellen des eines Paraboloidreflektors entstehen. Dieses Wissen kann vor allem dann eingesetzt werden, wenn Lichtverteilungen mit ausgeprägten Gradienten, beispielsweise horizontalen oder vertikalen Hell-Dunkel-Grenzen, erzeugt werden sollen. Eine entsprechende Übertragung wird präsentiert.

Dem Thema Lasersicherheit kommt eine besondere Beachtung zu, da die unkonvertierte Emission der Dioden der Laserklasse 4 nach DIN EN 60825 Teil 1 entspricht. Auf den Einsatz von transmissiven Leuchtstoffen wird im Musterbau im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da bei Versagen des Konverters nahezu kollimierte Laserstrahlung das Modul verlassen kann. Anhand

Tabelle 7.1: Vergleich der drei Muster

Muster	I	II	III
Optisches Konzept nach Abbildung 5.4	B	B	C
Anzahl Reflektorfacetten	9	25	5
Zusätzliche Linse	ja	ja	nein
Anzahl Laserdioden	4	4	3
Justage Strahlengang	Rotation der Dioden	Justagespiegel im Strahlengang	Translation der Dioden
Aktive Kühlung	Peltierelement	Axiallüfter	Axiallüfter
Max. Beleuchtungsstärke in lx	83,8	114,2	337,1*
Horizontale Breite in $^\circ$ bei 40 lx	4,6	2,9	2,4*
Horizontale Breite in $^\circ$ bei 10 lx	8,6	15,6	2,9*
jeweils in 25 m Entfernung			* Simulationsergebnis

möglicher Fehlerfälle werden deren Folgen für die Betriebssicherheit diskutiert und Gegenmaßnahmen wie aktive und passive Sicherheitskonzepte vorgeschlagen. Für die prototypischen Muster des Laserscheinwerfers kommen dabei nur passive Sicherheitskonzepte wie Strahlfallen in Frage. Aktive Lösungen funktionieren im Regelfall nur bei vollständig montierten Scheinwerfern. Dadurch ist die Analyse einzelner Komponenten, die ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist, oft nur bei einem außer Kraft gesetzten Sicherheitskonzept möglich.

Die Kombination aus reflektiv eingesetzten Leuchtstoffen und Rückprojektionssystemen kann besonders im Hinblick auf die passive Lasersicherheit nicht sinnvoll umgesetzt werden. Deswegen werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Musterscheinwerfer nach dem Konzept der Frontprojektion und ein weiterer mit einem nicht-rotationssymmetrischen Reflektor aufgebaut und in Kapitel 6 präsentiert. In Tabelle 7.1 sind die grundlegenden Unterschiede im optischen Konzept und der mechanischen Umsetzung der drei Scheinwerfermuster zusammengefasst sowie die lichttechnischen Mess- beziehungsweise Simulationsergebnisse angegeben.

Die Entwicklung von Muster I über Version II bis hin zum dritten, im Rahmen dieser Arbeit simulierten und gefertigten Muster ist von zwei parallelen Optimierungsprozessen geprägt. Auf der einen Seite gilt es, die optimale Lichtverteilung für ein Zusatzfernlicht zu finden. Die Hauptaufgabe eines solchen Moduls ist das Erzeugen einer hohen Lichtstärke im Zentrum der Lichtverteilung. Wird hier wie in der Simulation des Musters III das gesetzliche Maximum von 215.000 cd (entsprechend 344 lx im 25 m Entfernung) pro Scheinwerfer erreicht, so sind unter idealen Bedingungen Sichtweiten bezogen auf 4 lx von 328 m möglich. Gleichzeitig darf die Lichtverteilung nicht auf diesen Punkt fokussiert sein, um auch bei leichter Kurvenfahrt oder einer Nickbewegung des Fahrzeugs eine in der Größenordnung vergleichbare Sichtweite zu gewährleisten. Zudem muss der Übergang zwischen dem Bereich, den Zusatzfernlicht und normales Fernlicht gemeinsam erhellen, und dem übrigen Bereich, welcher alleine vom konven-

tionellen Fernlicht ausgeleuchtet wird, kontinuierlich erfolgen. Scharfe Übergänge im Lichtbild wirken an dieser Stelle störend und können den Fahrer ablenken.

Das Ziel bei den Mustern I und II liegt vor allem im Erzeugen einer horizontal ausgedehnten Lichtverteilung. Das zweite Muster ist für einen *Porsche 911er*-Scheinwerfer konzeptioniert. Der hier betrachtete Xenon-Projektionsscheinwerfer erzeugt im Fernlichtmodus eine Lichtverteilung, die im Bereich der Horizontlinie eine im Vergleich zum restlichen Lichtbild geringere Lichtstärke aufweist und hier von einem Halogen-Zusatzfernlicht unterstützt wird. Da das Lasermodul als Ersatz für dieses konventionelle Zusatzfernlicht gedacht ist, muss es die Horizontlinie in einer vergleichbaren Weise ausleuchten und somit über eine horizontal ausgedehnte Lichtverteilung verfügen. Mit dem letzten Muster III hingegen soll eine Beleuchtungsstärke an der Grenze des gesetzlichen Höchstwerts erzeugt werden, wobei eine deutliche Verringerung des horizontalen Abstrahlwinkels in Kauf genommen wird. In der Praxis muss die vom konventionellen Fernlicht erzeugte Beleuchtungsstärke berücksichtigt werden, so dass das Zusatzfernlicht nicht die vollen 344 lx in 25 m Entfernung erzeugen darf. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, kann der gesetzliche Höchstwert der Beleuchtungsstärke in idealer Weise mit einem kompakten und optisch ansprechenden Laserscheinwerfer erreicht werden.

Parallel zur Lichtverteilung wird der mechanische Aufbau des Moduls, auch im Hinblick auf die Kühlung der Laserdioden, optimiert. Die erste Generation basiert auf einer kompakten Kühleinrichtung für jede Diode, so dass jede Halbleiterlichtquelle mit ihrer Kollimationslinse und der Kühleinrichtung individuell durch Verkippen auf den Leuchtstoff ausgerichtet werden kann. Bei Muster II werden die Dioden starr mit einem zentralen, mit einem Axiallüfter versehenen Kühlkörper verbunden. Diese nicht einstellbare Montage der Dioden erfordert den Einsatz zusätzlicher Justagespiegel im Strahlengang. Das Konzept des dritten Musters ermöglicht durch ein Verschieben der Laserdioden einschließlich ihrer Kollimationslinsen ein Einstellen des Anregungspunktes auf dem Leuchtstoff, ohne auf weitere Elemente im Strahlengang angewiesen zu sein. Gleichzeitig ist eine gute thermische Anbindung an den zentralen Kühlkörper gegeben. Diese Lösung vereint die gute thermische Anbindung der Dioden mit einer hohen mechanischen Stabilität und, durch den Verzicht auf Justagespiegel, einem hohen optischen Wirkungsgrad.

7.2 Ausblick: Weitere Anwendungsgebiete von Laserlichtquellen im Fahrzeug

Der Einsatz von Laserlichtquellen ist besonders dort sinnvoll, wo Lichtquellen mit einer besonders kleinen Étendue und einem hohen Lichtstrom benötigt werden. Als statische Systeme im Kraftfahrzeug kommen hier neben den in dieser Arbeit betrachteten Zusatzfernlichtern vor allem besonders kompakte Abblendlichtscheinwerfer in Frage, welche hohen lichttechnischen Anforderungen gerecht werden müssen [FIED15a]. Auch ein Einsatz als schwenkbarer, kompakter Scheinwerfer zum Markieren von Gefahrenstellen ist denkbar [WEBE14b]. Aufgrund der kleinen Emissionsfläche der Lichtquelle können diese Scheinwerfer besonders scharfe Hell-Dunkel-Grenzen erzeugen, was die Erkennbarkeit der beleuchteten Gefahrenstelle erhöht.

Ein weiteres Anwendungsgebiet sind hochdynamische, hochauflösende Systeme. Diese Scheinwerfer stellen die konsequente Weiterentwicklung der Matrixsysteme aus Abschnitt 3.1 mit einer signifikant erhöhten Pixelzahl dar. Mit diesen sich aktuell in der Entwicklung befindlichen Systemen können alle Funktionen der Matrixsysteme umgesetzt werden. Darüber hinaus lassen sich Funktionen wie Schildentblendung und das Projizieren von Navigationsinformationen auf die Straße umsetzen, die eine deutlich größere Anzahl individuell ansteuerbarer Bildpunkte benötigen [JÜR15], [KLOP16b].

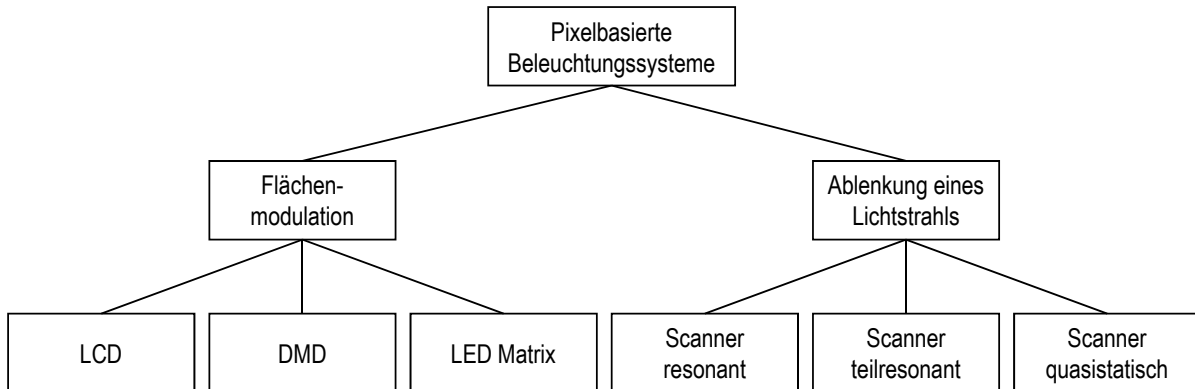


Abbildung 7.1: Einteilung pixelbasierter Beleuchtungssysteme nach [GUT14b], [KLOP16b]

Diese sogenannten pixelbasierten Lichtfunktionen lassen sich, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, durch Flächenmodulation oder durch eine zeitliche Ablenkung eines Lichtstrahls erzeugen. Flächenmodulierte Lichtverteilungen können hervorragend mit DMDs umgesetzt werden. Von diesen Mikrospiegelarrays des Herstellers *Texas Instruments*, die auf kompakter Baugröße eine Vielzahl von einzeln ansteuerbaren Mikrospiegeln bereitstellen, ist eine für Fahrzeuganwendungen zertifizierte Version erhältlich [BHAK15]. Beim Wechsel zwischen dem An- und dem Aus-Zustand eines Pixels wird der entsprechende Mikrospiegel um $\beta_{DMD} = 24^\circ$ gekippt. Um das gesamte Licht, welches von einem Spiegel umgelenkt wird, entweder in Richtung der Projektionsoptik (An-Zustand) oder auf einen Absorber (Aus-Zustand) zu lenken, muss der Öffnungswinkel des Lichtbündels, das auf einen Mikrospiegel trifft, begrenzt sein. In Kipprichtung der Mikrospiegel darf der Öffnungswinkel den Wert $2 \cdot \beta_{DMD} = 48^\circ$ für eine kontrastreiche Bilderzeugung nicht übersteigen. Gleichzeitig beträgt die Größe der zu beleuchtenden Fläche bei einem 0,3-Zoll-DMD etwa 25 mm^2 . Unter Berücksichtigung der Verluste im optischen System sollte die Lichtquelle etwa 6000 lm mit dem geforderten Öffnungswinkel auf diese Fläche konzentrieren [WOLF16b]. Diese Anforderungen an Étendue und Lichtstrom, die eine große Herausforderung für LEDs darstellen, lassen sich mit laserbasierten Weißlichtquellen erfüllen (vergleiche [SCHM16]).

Als Alternative zu DMDs wird der Einsatz von LCDs in der Fahrzeugtechnik diskutiert. Bei der Beleuchtung dieser Lichtmodulatoren mit Laserdioden bietet sich die Nutzung des Polarisationszustandes der Strahlung an. Nach Willeke kann dadurch einer der wirkungsgradreduzierenden Polarisatoren des LCDs entfallen [WILL15]. Neben der Überlagerung mehrerer Dioden mit unterschiedlichen Wellenlängen, wie von Willeke vorgeschlagen, lässt sich weißes Licht auch mit Hilfe eines Leuchtstoffs erzeugen, der einem LCD nachgeschaltet ist. In diesem Fall wird

die Bildinformation durch Modulation der breit aufgefächerten Anregungsstrahlung durch das LCD auf dem Leuchtstoff erzeugt und dieser über ein optisches System in den Verkehrsraum abgebildet. Bei diesem Ansatz ist es besonders wichtig, dass die in dieser Arbeit betrachtete Streuung des Lichts im Leuchtstoff gering ist. Anderenfalls leuchtet eine gegenüber dem angeregten Bereich deutlich größere Fläche des Konverters und macht das Erzeugen einer scharfen Lichtverteilung unmöglich.

Sowohl bei DMD- als auch bei LCD-basierten Systemen muss die Herausforderung gelöst werden, dass im Verkehrsraum eine stark inhomogene Lichtverteilung erzeugt werden soll. Während im Hot Spot 120 lx zurzeit als Mindestanforderung für ein Fernlicht angesehen werden, werden Vorfeld und Seitenbereiche mit einer weitaus geringeren Luxzahl, jeweils bezogen auf die 25 m-Testwand, beleuchtet. Würde ein DMD- oder LCD-Fahrzeugscheinwerfer eine homogene Lichtverteilung erzeugen, wie es bei Videoanwendungen der Fall ist, so müssten für jeden Bildpunkt die vollen 120 lx vorgehalten werden. Die Folge ist, dass beim Erzeugen einer Scheinwerferlichtverteilung nahezu alle Pixel permanent gedimmt werden müssen. Dadurch liegt der für ein solches System benötigte Lichtstrom weit über den erwähnten 6000 lm. Der Energieeintrag auf die bilderzeugende Einheit ist außerdem so groß, dass das DMD oder LCD unzulässig stark erhitzt wird. Kauschke schlägt eine inhomogene, auf die Mitte konzentrierte Beleuchtung eines DMDs vor [KAUS06], [GÜNT10]. Alternativ oder in Kombination mit diesem Ansatz kann das vom DMD oder LCD erzeugte Bild bewusst stark kissenförmig verzeichnet auf die Straße abgebildet werden [WOLF16b]. Beide Ansätze führen dazu, dass die Lichtstärke in Bildmitte erhöht und am Rand reduziert wird.

Das letzte hier betrachtete System nutzt ebenfalls einen flächigen Leuchtstoff, der über ein optisches System in den Verkehrsraum abgebildet wird. An Stelle eines LCDs kommt jedoch ein permanent bewegter (scannender) Laserstrahl zum Einsatz, so dass die einzelnen Bildpunkte nicht gleichzeitig, sondern sequentiell nacheinander auf dem Leuchtstoff angeregt werden [PETE15], [TATA16]. Die Ablenkung des Lasers kann dabei quasistatisch, teilresonant oder vollresonant erfolgen. In Kombination mit einer schnellen Ansteuerung der Laserdiode ist das Ein- und Ausschalten sowie Dimmen einzelner Bildpunkte möglich. Bei dieser Anwendung ist es wie bei der Kombination aus LCD und Leuchtstoff wichtig, dass die lichtabstrahlende Fläche des Konverters nur geringfügig größer ist als der von der Laserstrahlung angeregte Bereich.

Die Menge der hier vorgestellten möglichen Anwendungen lässt erwarten, dass in den kommenden Jahren viele laserbasierte Beleuchtungssysteme ihre Marktreife erreichen werden. In dieser Arbeit werden verschiedene Konzepte optischer Systeme für Laserlichtquellen erarbeitet und am Beispiel eines Zusatzfernlichts erörtert. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf viele der hier genannten Anwendungsfälle übertragen. Aus heutiger Sicht ist vor allem der bei erhöhten Temperaturen geringe Wirkungsgrad der Halbleiterlaser eine Herausforderung für den Fahrzeugeinsatz, die es im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten zu lösen gilt.

Literaturverzeichnis

- [ALBO13] ALBOU, Pierre; BOINET, L.; RAVIER, J. P.: Very thin headlamp with laser sources. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 15. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2013. – ISBN 978-3-8316-4291-5.
- [ALBR15] ALBRECHT, K. F.; AUSTERSCHULTE, A.; ROSENHAWN, E.-O.: Reality Check: Laser High Beam Performance in Real Driving Tests. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 375–384.
- [ASHD09] ASHDOWN, Ian: *Laser light source and luminaire*, Patentschrift AT 512 587 A1, 2009.
- [BACH07] BACHMANN, Volker M.: *Studies on luminescence and quenching mechanisms in phosphors for light emitting diodes*. Utrecht, Utrecht University, Dissertation, 2007.
- [BACH09] BACHMANN, Volker M.; RONDA, Cees; MEIJERINK, Andreis: Temperature Quenching of Yellow Ce³⁺ Luminescence in YAG:Ce. In: *Chemistry of Materials* 21 (2009), S. 2077–2084.
- [BASU13] BASU, Chandrajit; KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander; WOLLWEBER, Merve; ROTH, Bernhard; LACHMAYER, Roland: A High Power Blue Diode Laser Pumped White Light Source Using Remote Phosphors. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 15. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2013. – ISBN 978-3-8316-4291-5.
- [BERL14] BERLITZ, Stephan: *Projektsteckbrief ILaS*. 2014.
- [BHAK15] BHAKTA, Vikrant R.; BALLARD, Brian: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 483–494.
- [BLAS94] BLASSE, G.; GRABMAIER, B. C.: *Luminescent Materials*. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1994. – ISBN 978-3-540-58019-5.
- [BÖKE15] BÖKE, Björn; MAIER, Markus; MOISEL, Jörg; HEROLD, Florian: The Mercedes-Benz Headlamp of the Future: Higher Resolution with Greater Intelligence for En-

- hanced Safety. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 49–58.
- [BONY12a] BONY, Alexis; HAMAMI, Khaled: *Lichterzeugungsanordnung und Scheinwerfer mit einer Lichterzeugungsanordnung*, Offenlegungsschrift DE 10 2012 004 629 A1, 2012.
- [BONY12b] BONY, Alexis; MERTENS, Jens: *Beleuchtungsanordnung für ein Fahrzeug*, Offenlegungsschrift DE 10 2012 002 232 A1, 2012.
- [BONY14] BONY, Alexis: *Lichtquelleneinheit für ein Fahrzeug*, Offenlegungsschrift DE 10 2013 005 403 A1, 2014.
- [BRIE93] BRIERS, J. D.: Surface Roughness Evaluation. In: SIROHI, R. S. (Hrsg.): *Speckle metrology* Bd. 38. New York: Marcel Dekker, 1993. – ISBN 0-8247-8932-6, S. 373–426.
- [CHAV08] CHAVES, Julio: *Optical science and engineering*. Bd. 134: *Introduction to nonimaging optics*. Boca Raton: CRC Press, 2008. – ISBN 978-1-4200-5429-3.
- [DENA13] DENAULT, Kristin A.; CANTORE, Michael; NAKAMURA, Shuji; DENBAARS, Steven P.; SESHADRI, Ram: Efficient and stable laser-driven white lighting. In: *AIP Advances* 3 (2013), Nr. 7, S. 072107-1–6. – ISSN 21583226.
- [EDMU16] EDMUND OPTICS INC.: *Techspec 5mm Dia. Enhanced Aluminium, $\lambda/4$ Mirror*, online verfügbar unter <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-mirrors/flat-mirrors/quarter-wave-first-surface-mirrors/48404/>, zuletzt abgerufen am 04.07.2016, 2016.
- [EICH15] EICHLER, Hans J.; EICHLER, Jürgen: *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 978-3-642-41438-1.
- [ERDL13a] ERDL, Helmut; HANAFI, Abdelmalek: *Beleuchtungseinrichtung für ein Kraftfahrzeug*, Offenlegungsschrift DE 10 2011 085 378 A1, 2013.
- [ERDL13b] ERDL, Helmut; HANAFI, Abdelmalek: *Beleuchtungsanordnung für ein Kraftfahrzeug*, Offenlegungsschrift DE 10 2012 205 435 A1, 2013.
- [FIED15a] FIEDERLING, Roland; HERING, Oliver: LARP: Applications for Ultra High Luminance. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 319–327.
- [FIED15b] FIEDERLING, Roland; TROMMLER, Jenny; FEIL, Thomas; HAGER, Jürgen: Der nächste Schritt - das reine Laserlicht für Scheinwerfer. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 117 (2015), Nr. 4, S. 52–57.

- [FISC15] FISCHER, Jorne: *Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlichtsystems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nassen Fahrbahnen*. Garbsen, Dissertation, 2015.
- [FRIE14] FRIES, Benedikt; GUT, Carsten; LAUDENBACH, Thomas; MÜHLMEIER, Martin: Laserlicht für den Rennwagen Audi R18 E-Tron Quattro. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (2014), Nr. 6, S. 38–42.
- [GRAB15] GRABE, Tobias: *Vermessung und Optimierung eines Laserscheinwerfermoduls*. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit, 2015.
- [GRÖT15] GRÖTSCH, Stefan; PFEUFFER, Alexander; LIEBETRAU, Thomas; OPPERMAN, 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.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 241–250.
- [GÜNT10] GÜNTHER, Alexander: *Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2010.
- [GUT14a] GUT, Carsten; BERLITZ, Stephan: Laser headlamp: Experiences in motor sports for series development. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L’AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.
- [GUT14b] GUT, Carsten; ROTSCHELL, 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.
- [GUT15] GUT, Carsten; PETERSEN, A.; SEITZ, M.; JAHN, Patric; NEUMANN, Cornelius; BERLITZ, Stephan: Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer. In: VDI (Hrsg.): *17. Internationaler Kongress ELIV 2015* Bd. 2249. Düsseldorf: VDI-Verl., 2015. – ISBN 978–3–18–092249–2, S. 277–292.
- [HANA13] HANAFAI, Abdelmalek; ERDL, Helmut; WEBER, Stefan: A new efficient, compact vehicular illumination system using high-power semiconductor laser diodes. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 15. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2013. – ISBN 978–3–8316–4291–5.
- [HANS02] HANSMANN, Stefan: Laserdioden. In: VOGES, Edgar (Hrsg.); PETERMANN, Klaus (Hrsg.): *Optische Kommunikationstechnik*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer, 2002 (Engineering online library). – ISBN 3–540–67213–3.
- [HELM16] HELMER, Melanie; NEUMANN, Cornelius: Quantifizierung des Blendpotentials laserbasierter Scheinwerfersysteme. In: VDI (Hrsg.): *7. VDI-Tagung Optische*

- Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2278. Düsseldorf: VDI-Verl., 2016. – ISBN 978-3-18-092278-2, S. 205–216.
- [HESS15a] HESSE, Henrik: BMBF-Project VOLIFA 2020 - High resolution light distribution by using a LCD. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 495–502.
- [HESS15b] HESSE, Henrik: LED-Scheinwerfer für eine volladaptive Beleuchtung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 117 (2015), Nr. 11, S. 50–55.
- [HUNG13] HUNG, Po-Chieh; TSAO, Jeffrey Y.: Maximum White Luminous Efficacy of Radiation Versus Color Rendering Index and Color Temperature: Exact Results and a Useful Analytic Expression. In: *Journal of Display Technology* 9 (2013), Nr. 6, S. 405–412. – ISSN 1551-319X.
- [IKES06] IKESUE, Akio; AUNG, Yan L.; TAIRA, Takunori; KAMIMURA, Tomosumi; YOSHIDA, Kunio; MESSING, Gary L.: Progress in Ceramic Lasers. In: *Annual Review of Material Research* 36 (2006).
- [JÜR15] JÜRGENS, Christian: *Der kontrastadaptive Scheinwerfer: Dissertation*. Hannover: TEWISS, 2015. – ISBN 978-3-95900-015-4.
- [JÜST12] JÜSTEL, Thomas; MÖLLER, Stephanie; WINKLER, Holger; ADAM, Waldemar: Luminescent Materials. In: PELC, Hubert (Hrsg.): *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. Weinheim: Wiley-Blackwell, 2012. – ISBN 978-3-527306732.
- [JÜST13] JÜSTEL, Thomas: *Optimale Leuchtstoffe für LED-Applikationen*, Präsentation auf der 9. Tagung: LED in der Lichttechnik, 2013.
- [JÜST14] JÜSTEL, Thomas: *Inkohärente Lichtquellen Kap. 8 Lumineszenzmechanismen*, Vorlesungsunterlagen, 2014.
- [KAUS06] KAUSCHKE, Rainer: *HNI-Verlagsschriftenreihe*. Bd. 211: *Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern*. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst, 2006. – ISBN 978-3-939350-30-9.
- [KISH11a] KISHIMOTO, Katsuhiko: *Light Emitting Device, Illuminating Device, and Vehicle Headlamp*, Patentschrift US 2011/0280039 A1, 2011.
- [KISH11b] KISHIMOTO, Katsuhiko; KAWANISHI, Hidenori: *Vehicle Headlamp and Illuminating Device*, Patentschrift US 2011/0148280 A1, 2011.
- [KLEI14] KLEINKES, Michael: LED-Matrix Systems – Revolution and Evolution. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.
- [KLOO07] KLOOS, Gerhard: *Entwurf und Auslegung optischer Reflektoren: Theorie und Anwendungen*. Renningen: expert-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8169-2644-3.

- [KLOP13] KLOPPENBURG, Gerolf: *Development of a laser headlight*, Präsentation auf der Intelligent Automotive Lighting, 28.1.2013.
- [KLOP15] KLOPPENBURG, Gerolf: *Efficiency and light distribution of a laser based additional high beam module*, Präsentation auf der Intelligent Automotive Lighting, 27.1.2015.
- [KLOP16a] KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander: Eigenschaften und Validierung optischer Komponenten. In: LACHMAYER, Roland (Hrsg.); LIPPERT, Rene B. (Hrsg.); FAHLBUSCH, Thomas (Hrsg.): *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung*. Springer Verlag, 2016. – ISBN 978–3–662–49055–6.
- [KLOP16b] 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.
- [KNIT16] KNITTEL, Joachim; LICHT, Martin; JIN, Siqi; BUCHBERGER, Christian: Sicherheitskonzepte für Laserscheinwerfer. In: VDI (Hrsg.): *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2278. Düsseldorf: VDI-Verl., 2016. – ISBN 978–3–18–092278–2, S. 217–223.
- [KRÜG13] KRÜGER, Udo; SCHMIDT, Franz: Anwendung von modifizierten Farbmesskameras für photometrische Messungen im mesopischen Bereich. In: DEUTSCHE LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Licht 2012*. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG), 2013. – ISBN 978–3–927787–37–7, S. 217–221.
- [LACH14a] LACHMAYER, Roland; KLOPPENBURG, Gerolf; STEPHAN, Serge: Temperature issues with white laser diodes, calculation and approach for new packages. In: *Proc. of SPIE 9450* (2014), S. 94501P–1–8.
- [LACH14b] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; DANOV, Roman; KLOPPENBURG, Gerolf: Reflektorbasierte Laser-Lichtmodule als Zusatzfernlicht für die Fahrzeugbeleuchtung. In: NEDERLANDSE STICHTING VOOR VERLICHTUNGSKUNDE (Hrsg.): *Licht 2014*. Den Haag, 2014, S. 16–24.
- [LACH14c] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf: Lichtmodule auf Basis von laseraktiviertem Leuchtstoff für den Einsatz als Zusatzfernlicht. 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. 31–44.
- [LACH14d] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf: System efficiency of laser-based white light. In: *Advanced Optical Technologies* 3 (2014), Nr. 5-6, S. 523–530.

- [LACH15a] LACHMAYER, Roland; KLOPPENBURG, Gerolf; WOLF, Alexander: Rapid prototyping of reflectors for vehicle lighting using laser activated remote phosphor. In: *Proc. of SPIE 9383* (2015), S. 938305–1–12.
- [LACH15b] LACHMAYER, Roland; WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf: Additive manufacturing of optical components. In: *SPIE Newsroom* (2015).
- [LACH16] LACHMAYER, Roland: Beleuchtung. In: BRAESS, Hans-Hermann (Hrsg.); SEIFERT, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 (ATZ-MTZ-Fachbuch). – ISBN 978–3–658–09528–4.
- [LANG15] LANGKABEL, Frank: Possibilities to introduce a High End Lighting System in the Non- Premium Market. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 39–47.
- [LEHN14] LEHNER-ILSANKER, Tanja: *Der Audi R8 LMX - erstes Serienmodell der Welt mit Laser-Fernlicht*. 2014.
- [LENE13] LENEUF, Alan; KELSO, John; ZHENG, Yi; TCHOUL, Maxim: Radiance limits of ceramic phosphors under high excitation fluxes. In: *Proc. of SPIE 8841* (2013), S. 884107–1–20.
- [LENE14] LENEUF, Alan; KELSO, John; TCHOUL, Maxim; MEHL, Oliver; SORG, Jörg; ZHENG, Y.: Laser-activated remote phosphor conversion with ceramic phosphors. In: *Proc. of SPIE 9190* (2014), S. 91900C1–11.
- [LERO14] LEROUX, A.; REISS, B.; THABET, Z.: Laser Spot: specification study for improved safety and comfort. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L’AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.
- [MARX15] MARX, Robert: *Einsatz von Lasersinterbauteilen als optische Reflektoren für Laserscheinwerfer*. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit, 2015.
- [MUST14] MUSTER, Jasmin; HAGER, Jürgen; HERING, Oliver: *Remote-Phosphor-Leuchtvorrichtung*, Offenlegungsschrift DE 10 2012 223 857 A1, 2014.
- [NAKA00] NAKAMURA, Shuji; PEARTON, Stephen; FASOL, Gerhard: *The Blue Laser Diode: The Complete Story*. Second Updated and Extended edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [NAUM92] NAUMANN, Helmut; SCHRÖDER, Gottfried: *Bauelemente der Optik: Taschenbuch der technischen Optik; mit 84 Tabellen*. 6., neubearb. Aufl. München and Wien: Hanser, 1992. – ISBN 978–3446170360.
- [NEUM11] NEUMANN, A.; WIERER, J. J.; DAVIS, W.; OHNO, Y.; BRUECK, S. R. J.; TSAO, J. Y.: Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality. In: *Optics Express A* (2011), Nr. 19.
- [OSRA13a] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *PL TB450B preliminary*. 12.06.2013.

- [OSRA13b] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *Using OSRAM OS Visible InGaN Laser Diodes: Application Note*. 21.10.2013.
- [OSRA15] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH: *OSRAM OSTAR Headlamp Pro Datasheet LE UW U1A5 01: Version 2.3 - OS-PCN-2015-006-A*. 2015.
- [OSRA16a] OSRAM GMBH: *Silverstar 2.0 Familiendatenblatt*. 25.01.2016.
- [OSRA16b] OSRAM GMBH: *Xenarc Nicht Breaker Unlimited 66240XNB Produktdatenblatt*. 27.01.2016.
- [PETE15] PETERSEN, A.; HAGER, Jürgen; GUT, Carsten; SEITZ, M.; SCHWAIGER, S.; SCHLÖDER, U.; HELMER, M.; BERLITZ, Stephan; NEUMANN, Cornelius; HERING, Oliver: Challenges for MEMS based Scanning Laser System. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 355–364.
- [RADI12] RADIANT ZEMAX LLC: *Zemax 12: Optical Design Program User's Manual*. 2012.
- [REIF14] REIF, Konrad (Hrsg.): *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978–3–658–05047–4.
- [ROTH14] ROTH, Joscha; MEYER, Benjamin; THOMSCHKE, Sebastian: Laser scanning unit for light symbol projection. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.
- [ROTH15] ROTH, Joscha; WALLASCHEK, Jörg; KLOPPENBURG, Gerolf; LACHMAYER, Roland; MEYER, Benjamin; THOMSCHKE, Sebastian: RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 385–394.
- [ROTS15] ROTSCHELL, Ingo; NEUMANN, Cornelius: *Die Farbtemperatur in der Lichttechnik*, Präsentation auf der Lux Junior, 2015.
- [SCHM16] SCHMIDT, Christian; WILLEKE, Benjamin; FISCHER, Bernd: Laser versus Hochleistungs-LED. In: VDI (Hrsg.): *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2278. Düsseldorf: VDI-Verl., 2016. – ISBN 978–3–18–092278–2, S. 15–24.
- [SCHU06] SCHUBERT, E. F.: *Light-emitting diodes*. 2nd edition. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2006. – ISBN 978–0521865388.
- [SCHU14] SCHUG, J.; HOHN, R.; HECHTFISCHER, U.; HIKMET, R.; MACKENS, U.: Dedicated phosphor developments for future Laser based headlights. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.

- [SHAR99] SHARPE, Lindsay T.; STOCKMAN, Andrew; JÄGLE, Herbert; NATHANS, Jeremy: Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In: GEGENFURTNER, Karl R. (Hrsg.); SHARPE, Lindsay T. (Hrsg.): *Color Vision: From genes to perception*. New York: Cambridge University Press, 1999, S. 3–51.
- [STOK52] STOKES, George G.: On the Change of Refrangibility of Light. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 142 (1852), S. 463–562.
- [STRA07] STRAUSS, Steffen: *HNI-Verlagsschriftenreihe*. Bd. Bd. 226: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung*. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst, 2007. – ISBN 978–3–939350–45–3.
- [TAIL12] TAILORLUX GMBH: *Product Data Sheet TL-0036*. 27.02.2012.
- [TAPP13] TAPPE, F.; MEYER, J.: Behaviour of different luminescent materials towards high power densities. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 15. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2013. – ISBN 978–3–8316–4291–5.
- [TATA16] TATARTSCHUK, Eugen; KREUZER, Tobias: Laserbasiertes scannendes Pixellicht: Rotatorischer Spiegelansatz. In: VDI (Hrsg.): *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik // Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2278. Düsseldorf: VDI-Verl., 2016. – ISBN 978–3–18–092278–2, S. 269–280.
- [WEBE14a] WEBER, Stefan; BUCK, Alexander; AMANN, Christian: Laserlicht im BMW i8 - Design, Systemintegration und Test. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* (2014), Nr. 09/2014, S. 60–65.
- [WEBE14b] WEBER, Stefan; SCHNEIDER, D.; UEBLER, R.: Usage of laser light sources for marking light. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.
- [WEBE15] WEBER, Stefan; AULBACH, Johannes; ERDL, Helmut: *Verfahren zum Betrieb eines Scheinwerfers mit Laserlichtquelle in einem Kraftfahrzeug*, Offenlegungsschrift DE 10 2013 216 572 A1, 2015.
- [WERK14] WERKSTETTER, Mario; WEBER, Stefan; HIRTH, Florian; AMANN, Christian: Laserlicht im BMW i8 - Ansteuerung und E/E-Integration. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* (2014), Nr. 04/2014, S. 26–30.
- [WILL15] WILLEKE, Benjamin; SCHÜLER, F.; KLEY, F.; FISCHER, G.: High Resolution Headlamp – Investigation towards a RGB-Laser LCD Backlight. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978–3–8316–4482–7, S. 531–536.

- [WOLF16a] WOLF, Alexander: *Simulation des optomechatronischen Verhaltens laserbasierter Beleuchtungssysteme*, Präsentation auf dem PhotonicNet Workshop Simulationen in der Photonik, 24.05.2016.
- [WOLF16b] 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.
- [WOLF16c] WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Hybrid simulation of thermo-optical effects in laser-based white light sources. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK (Hrsg.): *DGaO-proceedings 117. Jahrestagung*, 2016. – ISSN 1614–8436.
- [WÖRD07] WÖRDENWEBER, Burkard; WALLASCHEK, Jörg; BOYCE, Peter; HOFFMAN, Donald D.: *Automotive Lighting and Human Vision*. Berlin, New York: Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–36696–6.
- [XU99] XU, Yong-Nian; CHING, W. Y.: Electronic structure of yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$). In: *Physical Review B* 59 (1999), Nr. 16, S. 10530–10535.
- [YEN07] YEN, W. M. (Hrsg.); SHIONOYA, Shigeo (Hrsg.); YAMAMOTO, Hajime (Hrsg.): *Phosphor handbook*. 2nd edition. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor and Francis, 2007 (The CRC Press laser and optical science and technology series). – ISBN 978–0–8493–3564–8.

Verwendete Normen und Richtlinien

- [CIE 1931] CIE 1931: *Standard Colorimetric Observer*. 1931. Herunterladbarer Datensatz unter http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/index.php?i_ca_id=298, letzter Zugriff 27.06.2016
- [DIN 5032-7] DIN-Norm 5032 Teil 7: *Lichtmessung; Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemeßgeräten*. 10.1985
- [DIN EN 60825-1] DIN EN-Norm 60825 Teil 1: *Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen*. 11.2012
- [ECE 48] ECE-Richtlinie 48: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignal-einrichtungen*. 30.01.2011
- [ECE 112] ECE-Richtlinie 112: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind*. 22.08.2014
- [ECE 113] ECE-Richtlinie 113: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für symmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen, Gasentladungs-Lichtquellen oder LED-Modulen ausgerüstet sind*. 14.06.2014
- [ECE 123] ECE-Richtlinie 123: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge*. 24.10.2010

Anhang

A Tabellen

Tabelle A.1: Genutztes Licht eines Lambertstrahlers bei Rückprojektion als Vielfaches der Brennweite f

Nutzanteil Φ_R/Φ	Verlustanteil $1 - \Phi_R/\Phi$	Winkel δ_R in $^\circ$	Größe Paraboloidreflektor	
			Durchmesser d^*	Länge l^*
1,00	0,00	90,0	4,00	1,00
0,99	0,01	84,3	3,62	0,82
0,97	0,03	80,0	3,36	0,70
0,95	0,05	77,1	3,19	0,63
0,90	0,10	71,6	2,88	0,52
0,80	0,20	63,4	2,47	0,38
0,70	0,30	56,7	2,16	0,29
0,60	0,40	50,7	1,90	0,22
0,50	0,50	45,0	1,66	0,17
0,40	0,60	39,2	1,42	0,13
0,30	0,70	33,2	1,19	0,09
0,20	0,80	26,6	0,95	0,06
0,10	0,90	18,4	0,65	0,03
0,00	1,00	0,0	0,00	0,00
d^*	Durchmesser des Reflektors als Vielfaches der Brennweite f			
l^*	Länge des Reflektors als Vielfaches der Brennweite f			

Tabelle A.2: Genutztes Licht eines Lambertstrahlers bei Frontprojektion als Vielfaches der Brennweite f

Nutzanteil Φ_F/Φ	Verlustanteil $1 - \Phi_F/\Phi$	Winkel ε_1 in $^\circ$	Größe Paraboloidreflektor	
			Durchmesser d^*	Länge l^*
1,00	0,00	0,0	nicht möglich	
0,99	0,01	5,7	79,8	397,0
0,97	0,03	10,0	45,8	130,3
0,95	0,05	12,9	35,3	77,0
0,90	0,10	18,4	24,7	37,0
0,80	0,20	26,6	16,9	16,9
0,70	0,30	33,3	13,4	10,2
0,60	0,40	39,3	11,2	6,9
0,50	0,50	45,5	9,7	4,8
0,40	0,60	50,8	8,4	3,4
0,30	0,70	56,8	7,4	2,4
0,20	0,80	63,4	6,5	1,6
0,10	0,90	71,6	5,6	0,9
0,00	1,00	90,0	4,0	0,0
d^*	Durchmesser des Reflektors als Vielfaches der Brennweite f			
l^*	Länge des Reflektors als Vielfaches der Brennweite f			

Tabelle A.3: Abhängigkeit des Diodenspektrums vom Betriebszustand

Strom in mA	Betriebsart	Dutycycle	Frequenz in kHz	T_C in °C	λ_{max} in nm	λ_h in nm	I_c in μm
400	cw	-	-	25	446,46	2,22	89,79
600	cw	-	-	25	446,72	2,36	84,56
800	cw	-	-	25	447,74	2,36	84,95
1000	cw	-	-	25	448,50	2,24	89,80
1200	cw	-	-	25	449,24	2,26	89,30
400	cw	-	-	60	448,16	2,32	86,57
600	cw	-	-	60	448,96	2,32	86,88
800	cw	-	-	60	449,90	2,20	92,00
1000	cw	-	-	60	450,62	2,24	90,65
1200	cw	-	-	60	451,71	2,20	92,75
600	Rechteckpuls	0,5	10	25	447,80	2,38	84,25
600	Rechteckpuls	0,5	50	25	447,66	2,20	91,09
600	Rechteckpuls	0,5	100	25	447,46	2,30	87,05
600	Sinuspuls	0,5	10	25	447,72	2,22	90,29
600	Sinuspuls	0,5	50	25	447,72	2,28	87,80
600	Sinuspuls	0,5	100	25	447,34	2,30	87,01

Bei Pulsbetrieb ist für λ_h die Halbwertsbreite FWHM der maximalen Einhüllenden angegeben, vergleiche Abschnitt 6.1.2.

B Betreute studentische Arbeiten

Tabelle B.1: Alphabetische Übersicht der betreuten studentischen Arbeiten

Name	Art der Arbeit	Titel der Arbeit
Carrico, James	Austauschstudent	High Beam Distributions using Laser Diodes with Remote Phosphor Application
Grabe, Tobias	Bachelorarbeit	Untersuchungen zur Optimierung eines Laserscheinwerfermoduls
Hund, Eric Carsten	Studienarbeit	Kosten-Nutzen-Vergleich des Einsatzes unterschiedlicher Rapid-Prototyping-Verfahren für die Automobile Lichttechnik
Ihme, Maximilian	Projektarbeit	Rapid Prototyping optischer Komponenten
Ihme, Maximilian	Projektarbeit	Ausarbeitung und Inbetriebnahme eines Logoprojektors mit Polymerlinsen
Kuchemüller, Kim Beatrice	Bachelorarbeit	Untersuchung von geometrisch induzierten Reflexionen von Intraokularlinsen
Küster, Benjamin	Bachelorarbeit	Konzeptionierung eines Messgeräts zur Erfassung von Oberflächeneigenschaften
Marx, Robert	Bachelorarbeit	Einsatz von Lasersinterbauteilen als optische Reflektoren für Laserscheinwerfer

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Alexander Gordon Wolf
Geburtsdatum	22. Mai 1984
Geburtsort	Hannover

Akademischer Werdegang

seit 2011	Doktorand an der Fakultät für Maschinenbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
2003 - 2010	Diplom-Studium Maschinenbau an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover Vertiefungen: Verfahrenstechnik und Biomedizintechnik Abschluss: Diplom Ingenieur Maschinenbau (Note 1,7)

Schulbildung

1996 - 2003	Gymnasium Mellendorf Abschluss: Allgemeine Hochschulreife (Note 2,2)
-------------	---

Beruflicher Werdegang

seit 2016	Tutor des Promotionsprogramms Tailored Light am Hannoverschen Zentrum für optische Technologien (HOT) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
seit 2011	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover in der Arbeitsgruppe Optomechatronik
2010 - 2011	Nachhilfelehrer bei der Schülerhilfe GmbH & Co. KG in Mellendorf in den höheren Klassenstufen einschließlich Prüfungsvorbereitung zum Abitur in den Fächern Mathematik und Physik
