

Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung

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

Dissertation

von
Dipl.-Ing.
Gerolf Kloppenburg

2017

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
 2. Referent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
- Tag der Promotion: 25. Oktober 2017

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.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer für die außerordentlich hilfreiche Betreuung, die wertvollen wissenschaftlichen Anregungen und das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit als Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Institut bedanken. Ebenso vielen Dank auch an Prof. Dr. Cornelius Neumann für die Übernahme des Korreferats und die interessanten fachlichen Unterhaltungen. Vielen Dank auch an Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem allen meinen Kollegen am IPeG, die mich in meiner Zeit am Institut begleitet und unterstützt haben. Dabei möchte ich insbesondere Alexander Wolf hervorheben, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Weiterhin bedanke ich mich bei Arne Deiters, Bastian Sauthoff, Philipp Gottwald und Iryna Mozgova, die mir die Arbeit am IPeG von Beginn an erleichtert haben. Vielen Dank ebenso an Florian Johannknecht und Bastian Lippert und auch die tatkräftige Unterstützung der Werkstatt mit ihrem Leiter Gordon Reh hat sehr zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Ein großer Teil der Arbeit entstand im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Konzernforschung der Volkswagen AG, wofür ich mich herzlich bei Sebastian Thomschke und Joscha Roth bedanken möchte.

Schließlich möchte ich auch meinen Freunden wie auch meiner Familie danken für ihre fortwährende Ermutigung und Unterstützung in allen Lebenslagen.

Gerolf Kloppenburg

Hannover, im November 2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	IX
Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einleitung	1
2 Stand von Forschung und Technik	5
2.1 Lichttechnische Grundlagen	5
2.1.1 Lichttechnische Größen	5
2.1.2 Menschliches Sehen	8
2.1.3 Abstrahlcharakteristiken von Lichtquellen	11
2.1.4 Étendue	13
2.2 Laser als Lichtquellen	14
2.2.1 Eigenschaften von Laserlicht	14
2.2.2 Weißlicht- und Farberzeugung aus Laserquellen	19
2.3 Fahrzeugscheinwerfer	23
2.3.1 Gesetzliche Randbedingungen für Frontscheinwerfer	23
2.3.2 Hochauflösende Scheinwerfersysteme	25
2.3.3 Laserbasierte Fahrzeugscheinwerfer	26
2.4 Head-Up-Displays	27
3 Funktionsumfang und Anforderungen an die scannende Laserprojektion	31
3.1 Fahrerassistenzfunktionen	32
3.2 Informationsprojektion und lichttechnische Anforderungen	36
3.2.1 Darstellungsbereich	36
3.2.2 Beleuchtungsstärke und Lichtstrom	38

3.2.3	Farbraum	43
3.2.4	Bildwiederholffrequenz und Auflösung	44
3.3	Konstruktive Anforderungen	47
3.4	Elektrische Anforderungen	48
3.5	Zusammenfassung der Anforderungen	49
4	Konzepte zur hochauflösenden Bilderzeugung	53
4.1	Elemente zur Bilderzeugung	53
4.1.1	DMD	54
4.1.2	LCD	57
4.1.3	LCoS	59
4.1.4	LED-Array	61
4.1.5	Rotationsspiegel	62
4.1.6	MEMS/ MOEMS	64
4.2	Konzeptvergleich anhand eines Konstruktionskataloges	67
5	Auslegung des scannenden Laserprojektionsmoduls	73
5.1	Systemkonzept	74
5.2	Konzepte zur Mikrospiegelsteuerung	75
5.2.1	Ansteuerung resonant-resonant	76
5.2.2	Ansteuerung quasistatisch-resonant	77
5.2.3	Ansteuerung quasistatisch-quasistatisch	77
5.3	Auswahl eines Scanners	78
5.4	Aufbau des optischen Systems zur Farbmischung	81
5.4.1	Lichtleiter	81
5.4.2	Dichroitische Spiegel	82
5.4.3	Dichroitische Prismen	84
5.4.4	Versetzte Diodenanordnung	85
5.4.5	Dispersives optisches Element	86
5.4.6	Diffraktives optisches Element	86
5.4.7	Auswertung der Farbmischung	86
5.5	Auswahl des optischen Konzepts	89
5.6	Eigenschaften der Laserquellen	92
5.7	Ansteuerung zur Bilderzeugung	95

5.8	Simulation des optischen Pfades	98
5.9	Lasersicherheit	101
5.9.1	Photobiologische Sicherheit	101
5.9.2	Berechnung für den Prototypenaufbau	103
6	Validierung des Prototyps	109
6.1	Effizienz des optischen Systems	110
6.2	Lichtstrom und Beleuchtungsstärke	114
6.3	RGB-Strahlkombination und Spotgeometrie	117
6.4	Farbmischung	119
6.5	Diodenansteuerung	121
6.5.1	Anstiegszeit	121
6.5.2	Abfallzeit	125
6.5.3	Regelung des Diodenstroms	127
6.6	Wirkung im Verkehrsraum	129
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
7.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	133
7.2	Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	139
	Anhang	153
	A Messergebnisse	153
	B Betreute studentische Arbeiten	161

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage, Internationale Beleuchtungskommission
cw	Continuous wave, zeitlich konstante Abstrahlung
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Micromirror Device
FWHM	Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum)
HUD	Head-Up-Display
LCD	Liquid Crystal Display
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
LD	Laserdiode
LED	Light-Emitting Diode
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MOEMS	Micro-Opto-Electro- Mechanical System
NIR	Nahes Infrarot, Near Infrared
PWM	Pulsweitenmodulation
RGB	Farbmischung aus rot, grün und blau
SAE	SAE International, ehemals: Society of Automotive Engineers
StVO	Straßenverkehrsordnung
SUV	Sport Utility Vehicle, Geländelimousine
SW	Scheinwerfer
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

UV	Ultraviolettstrahlung
WPE	Wall-Plug Efficiency, Wirkungsgrad aus elektrisch aufgenommene Leistung zu optischer Abstrahlung

Lateinische Notation

C	Weber-Kontrast
E_U	Unterschiedsempfindlichkeit
E_v	Beleuchtungsstärke
f_{Bild}	Bildwiederholffrequenz
f_{LD}	Schaltfrequenz der Laserdiode
f_x	Mikrospeigelfrequenz horizontal
f_y	Mikrospeigelfrequenz vertikal
G	Étendue
I	Stromstärke, Betriebsstrom der Laserdiode
I_{LD}	Betriebsstrom der Laserdiode
I_v	Lichtstärke
K_m	Photometrisches Strahlungsäquivalent ($K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$)
L_U	Umgebungsleuchtdichte
L_v	Leuchtdichte
P_{el}	Elektrische Leistung
P_{opt}	Optische Leistung
s	Länge des optischen Pfades
T	Temperatur
T_{Case}	Gehäusetemperatur der Laserdiode
t	Zeit
t_R	Reaktionszeit
UE	Unterschiedsempfindlichkeit
$V(\lambda)$	Helligkeitsempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges (Tagsehen)
$V'(\lambda)$	Helligkeitsempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges (Nachtsehen)
X, Y, Z	Intensitätseindrücke der drei Zapfentypen nach CIE 1931
x, y, z	Farbortskordinaten nach CIE 1931

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Empfindlichkeitskurven des menschlichen Auges nach CIE 1931
z_{SW}	Anbauhöhe Scheinwerfer

Griechische Notation

α	Abstrahl- und Betrachtungswinkel
ε	Ein- bzw. Ausfallswinkel des Lichts
η	Wirkungsgrad
$\Theta_{\parallel}, \Theta_{\perp}$	Strahldivergenz der Laserdiode
λ	Wellenlänge der Strahlung
ϱ	Reflexionsgrad
τ_{rise}	Anstiegszeit, Einschaltverzögerung
τ_{fall}	Abfallzeit, Ausschaltverzögerung
Φ_v	Lichtstrom
Φ_e	Optischer Strahlungsfluss
φ_h	Horizontaler Öffnungswinkel der Projektion
φ_v	Vertikaler Öffnungswinkel der Projektion
Ω	Raumwinkel

Kurzfassung

Die Forschung an neuartigen Beleuchtungssystemen für das Fahrzeug zielt darauf ab, dem Fahrer eine optimale Sicht und Ausleuchtung der Umgebung zu ermöglichen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund relevant, dass der größte Teil der Informationen beim Fahren visuell aufgenommen wird. In Kombination mit Daten aus der Fahrzeugsensorik können dazu Bilder generiert werden, die den Fahrer in vielen Situationen unterstützen und so dabei helfen, Unfälle zu vermeiden. Gegenwärtige Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugscheinwerfer haben bereits zum Ziel, eine möglichst große Anzahl von Lichtsegmenten vor dem Fahrzeug individuell anzusteuern um eine situationsangepasste Ausleuchtung des Verkehrsraums zu ermöglichen. Im Hinblick auf autonom fahrende Fahrzeuge gewinnt zusätzlich dazu auch die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, gegebenenfalls aber auch mit den Fahrzeuginsassen an zusätzlicher Bedeutung.

Als nächster Schritt in der lichtbasierten Fahrerassistenz werden im Rahmen dieser Arbeit Informationsprojektionen in den Verkehrsraum zur Unterstützung des Fahrers behandelt. Ziel ist der Aufbau eines geeigneten Projektors für die Darstellung farbiger Fahrerassistenzinformationen im Verkehrsraum. Dazu werden die Anforderungen an den optischen Aufbau eines solchen Systems erarbeitet. Besondere Berücksichtigung finden dabei die benötigte Lichtmenge für die Sichtbarkeit der Darstellung, der darstellbare Farbraum, der Bereich, in dem eine Projektion erfolgen sollte und die Ansteuerung der Lichtquelle für die Bilderzeugung. Aufbauend auf den Anforderungen werden Konzepte für die Umsetzung der hochauflösenden Bilderzeugung erarbeitet und bewertet.

Die Umsetzung erfolgt in Form eines Demonstrators mit drei Laserdioden in den Farben rot, grün und blau zur Erzeugung einer Farbmischung und in Kombination mit einem scannend eingesetzten Mikroskopspiegel für die Bilderzeugung. Anhand dieses Systems werden die Einsatzmöglichkeiten für die Darstellung von Fahrerassistenzinformationen evaluiert.

Schlagwörter: Fahrerassistenz, Laserdiode, Mikros scanner, Fahrzeugbeleuchtung

Abstract

Scanning laser projection unit for vehicle front lighting

Research on novel lighting systems for the vehicle aims to provide the driver with an optimum view and illumination of the surroundings. This is particularly relevant in view of the fact that most of the information is perceived visually while driving. In combination with data from vehicle sensors, images can be generated that assist the driver in many situations and thus help prevent accidents. Current developments in the area of vehicle headlights already aim at individually controlling as large a number of light segments as possible in front of the vehicle in order to allow a situation-adapted illumination of the traffic space. With regard to autonomous vehicles, communication with other road users, but also with the vehicle occupants, is of additional importance.

As the next step in the light-based driver assistance, information projections in the traffic area to support the driver will be dealt with in this work. The aim is to design a suitable projector for the projection of colored driver assistance information in the traffic area. For this purpose, the requirements for the optical design of such a system are elaborated. Particular consideration is given to the required light quantity for the visibility of the projected image, the color space which can be represented, the region in which a projection should take place and the control of the light source for the image generation. Based on these requirements, concepts for the implementation of high-resolution image generation are developed and evaluated.

The implementation is carried out in the form of a demonstrator with three laser diodes in the colors red, green and blue to produce a color mixture and in combination with a scanning microscope used for image generation. Based on this system, the possible applications for the display of driver assistance information are evaluated.

Key words: driver assistance, laser diode, micro scanner, vehicle lighting

1 Einleitung

Die Reduzierung von Verkehrsunfällen, insbesondere solche mit tödlichem Ausgang, ist ein sehr wichtiges Ziel von Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit dem Straßenverkehr. Dies ist unter anderem von der Europäischen Kommission durch den deutschen Verkehrssicherheitsrat mit der Strategie *Vision Zero* in Form von vorgeschlagenen Maßnahmen formuliert worden [DEUT12]. Einige dieser Vorschläge zur Steigerung der Verkehrssicherheit beinhalten die Weiterentwicklung lichttechnischer Systeme am Fahrzeug, wie etwa adaptives Kurvenlicht oder visuelle Spurwechselwarnungen.

Da Autofahrer etwa 90 % der Informationen über das Auge aufnehmen, spielen lichtbasierte Funktionen eine sehr große Rolle im Straßenverkehr und bei der Verkehrssicherheit [AMSE10]. Weiterhin besteht bei einer Nachtfahrt verglichen mit der Fahrt bei Tag trotz geringeren Verkehrsaufkommens ein deutlich höheres Unfallrisiko mit schwerwiegenden Unfallfolgen [AMSE10].

Neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung bestehender Lichtsysteme hin zu immer helleren Leuchten, hat die Einführung von LED-Scheinwerfern mit einer Vielzahl einzeln ansteuerbarer Elemente einen großen Sprung in der Funktionsvielfalt der Scheinwerfer bewirkt. Das Licht kann damit optimal an die Situation angepasst im Verkehrsraum verteilt werden, so dass auch die klassische Unterscheidung zwischen Fern- und Abblendlicht überflüssig wird [REIM15].

Im Kontext dieser Entwicklungen stehen viele aktuelle Forschungsarbeiten und -projekte, die sich der individuellen, situationsangepassten Ausleuchtung des Verkehrsraums widmen. Dadurch können relevante Bereiche zum einen besonders beleuchtet und die Aufmerksamkeit des Fahrers somit dorthin gelenkt werden, zum anderen kann aber auch eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer oder auch eine Selbstblendung des Fahrers durch Reflexionen vermieden werden.

Weitere Aspekte der Strategie *Vision Zero* zielen auf die Unterstützung des Fahrers in bestimmten Fahrsituationen, beispielsweise beim Spurwechsel. Diese Assistenten werden derzeit über haptische Signale durch das Lenkrad oder als Lichtsignale in den Seitenspiegeln umgesetzt.

Zusätzlich zur Unterstützung des Fahrzeugführers stehen weitere Herausforderungen im Hinblick auf das automatisierte und autonome Fahren von Fahrzeugen im Fokus der Forschung. Automatisiert durchgeführte Fahrmanöver müssen den Insassen gegebenenfalls kenntlich gemacht werden, ebenso wie die Notwendigkeit einer Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner Umgebung entsteht.

Gegenwärtig durchgeführte Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Fahrerassistenz durch Projektionssysteme an der Fahrzeugfront beinhalten die Erzeugung hochaufgelöster Hell-Dunkel-Kontraste über verschiedene Bilderzeugungstechnologien, wie etwa über ein Flüssigkristalldisplay [HESS15a], ein Mikrospiegelarray [LEE11],[WOLF16a] oder über ein Multi-LED-Array [GRÖT15]. Während mit diesen Technologien auch Symbole projiziert werden können, so wird doch lediglich weißes Licht verwendet und die Darstellung farbiger Informationen wie etwa bei einem Head-Up-Display ist nicht vorgesehen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung von Konzepten für ein Projektionssystem, das in der Lage ist, farbige Informationen vor dem Fahrzeug darzustellen und so dem Fahrer oder der Umgebung eine Unterstützung zu bieten und dadurch die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Das Zielsystem geht über gegenwärtige Forschungen insbesondere im Hinblick auf die farbige Darstellung und die Möglichkeit der Erzeugung hoher Kontraste aufgrund der Nutzung direkt emittierter Laserstrahlen hinaus. Umgesetzt wird eines der Konzepte anhand eines Prototypenaufbaus, der aus einem zweidimensional angesteuerten Mikrospiegel mit Laserdioden als Lichtquelle besteht. Die Bilderzeugung erfolgt scannend über eine hochfrequente Ansteuerung des Mikrospiegels und der Laser.

Die Auslegung des Schwingungsverhaltens der Systemkomponenten sowie einen Teil der Regelung zur Bilderzeugung sind durch ROTH [ROTH16] durchgeführt und veröffentlicht worden. Die vorliegende Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Erarbeitung von Anforderungen an das optische System und der anschließenden methodischen Konzeptauswahl für Bilderzeugung und Strahlführung. Dabei werden vergleichbare Bilderzeugungsverfahren ebenfalls berücksichtigt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Informationsprojektion beurteilt.

Nach der Einordnung des Themas in den Stand aktueller Forschung in Kapitel 2 werden die Anforderungen an den scannenden Laserprojektor in Kapitel 3 mit einem Schwerpunkt auf dem optischen System hergeleitet und ausgearbeitet. Im darauffolgenden Kapitel 4 werden alternative Konzepte zur Umsetzung der hochauflösenden Bilderzeugung vorgestellt und hinsichtlich der erarbeiteten Anforderungen für den Einsatz bei der farbigen Informationsprojektion bewertet und dabei mit dem angestrebten scannenden System verglichen.

Das daran anschließende Kapitel 5 behandelt die Auslegung des zuvor erstellten und ausgewählten Konzepts beginnend mit einem Funktionsprinzip des angestrebten Aufbaus und dessen Einordnung in die Fahrzeuginfrastruktur. Weiterhin erfolgt die Ausarbeitung eines optischen Systems zur Farberzeugung und zur Strahlüberlagerung der verwendeten Laserquellen sowie die Ansteuerung des bilderzeugenden Systems. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung zur Lasersicherheit des Zielaufbaus.

Zur Validierung der zuvor gestellten Anforderungen an eine Informationsprojektion wird das erarbeitete Konzept in Form eines Prototyps umgesetzt und hinsichtlich der geforderten lichttechnischen Eigenschaften und der Ansteuerung in Kapitel 6 untersucht. Abschließend wird eine Betrachtung der Wirkung im Verkehrsraum anhand von Beispielprojektionen durchgeführt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschungspotenziale.

2 Stand von Forschung und Technik

In diesem Kapitel werden beginnend mit Abschnitt 2.1 die lichttechnischen Grundlagen vorgestellt, die in den weiteren Kapiteln Anwendung finden und den durchgeführten Berechnungen zugrunde liegen. Weiterhin werden die für das menschliche Sehen relevanten Zusammenhänge dargestellt und anschließend die für die Bilderzeugung benötigten grundlegenden optischen Zusammenhänge dargelegt.

Im darauffolgenden Abschnitt 2.2 erfolgt eine Darstellung der physikalischen Grundlagen der relevanten Lichtquellen und deren Anwendungsmöglichkeiten für die Beleuchtungstechnik.

Weiterhin wird das Thema in den Abschnitten 2.3 und 2.4 in den Kontext aktueller Forschung und Entwicklung im Bereich der Fahrzeugscheinwerfer und der lichtbasierten Fahrerassistenz eingeordnet.

2.1 Lichttechnische Grundlagen

Neben den lichttechnischen Größen, die für die Systemauslegung erforderlich sind, werden im nachfolgenden Abschnitt insbesondere die Grundlagen des menschlichen Sehens aufgeführt und die für die Auslegung optischer Systeme relevanten Aspekte der Abstrahlung von Lichtquellen und der Étendue erläutert.

2.1.1 Lichttechnische Größen

Zur Bewertung lichttechnischer Größen muss zwischen dem radiometrischen und dem photometrischen System unterschieden werden. Radiometrische Größen beziehen sich direkt auf physikalisch messbare Leistungen und Intensitäten, während die photometrischen Größen ge-

wichtet werden. Hierzu werden die experimentell ermittelten Helligkeitsempfindlichkeitskurven des menschlichen Auges ($V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$) herangezogen, die in Abschnitt 2.1.2 näher erläutert werden.

Da im Rahmen dieser Arbeit ein Projektionssystem zur Wiedergabe von Informationen für den Menschen entwickelt wird, sind vorrangig die photometrischen Größen von Bedeutung.

Lichtstärke

Die Lichtstärke I_V bildet mit der dazugehörigen SI-Einheit *Candela* (cd) die Grundgröße des photometrischen Systems. Davon abgeleitet werden Größen wie der Lichtstrom Φ_V , die Beleuchtungsstärke E_V und die Leuchtdichte L_V . Die Lichtstärke ist definiert als der Lichtstrom pro Raumwinkeleinheit, der von $\frac{1}{60}$ cm² eines schwarzen Körpers bei der Schmelztemperatur von Platin (2042 K) ausgeht [MESC10].

Der Raumwinkel hat die Einheit *Steradian* (sr) und stellt das räumliche Äquivalent zum ebenen Winkel dar. Für eine Teilfläche A einer Kugeloberfläche mit dem Kugelradius r ist er definiert als

$$\Omega = \frac{A}{r^2}. \quad (2.1)$$

Für die Lichtstärke gilt somit

$$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega}. \quad (2.2)$$

Lichtstrom

Der Lichtstrom Φ_V ist definiert als die gesamte, von einer Lichtquelle abgestrahlte Leistung Φ_e im für das Auge relevanten Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm und bewertet mit der Helligkeitsempfindlichkeit des Auges. Die Einheit des Lichtstroms ist *Lumen* (lm) und die entsprechende Formel ist in Gleichung 2.3 angeführt. Hieraus wird ersichtlich, dass sowohl die Strahlungsleistung als auch die Helligkeitsempfindlichkeit von der Wellenlänge der Strahlung (λ) abhängig sind. Zusätzlich wird das Integral mit einem Skalierungsfaktor $K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ für die Helligkeitsempfindlichkeitskurve multipliziert:

$$\Phi_V = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (2.3)$$

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke E_v hat die Einheit Lux (lx) und bezeichnet den Lichtstrom, der eine bestimmte Fläche A trifft. Da jeder Punkt der Fläche eine andere Beleuchtungsstärke haben kann, wird der differentielle Wert dA betrachtet.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (2.4)$$

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte L_v eines Objekts stellt den Anteil der Lichtstärke dar, der von einem Flächenelement in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird, wie in Gleichung 2.5 aufgeführt. Der Winkel α ist dabei der Abstrahlwinkel und die dazugehörige Einheit ist cd/m^2 . [MESC10]

$$L_v = \frac{dI_v(\alpha)}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (2.5)$$

Liegt eine konstante, winkelnunabhängige Leuchtdichte vor, so wird das Objekt als *Lambertstrahler* bezeichnet, was in Abschnitt 2.1.3 weiter ausgeführt ist.

Fotometrisches Entfernungsgesetz

Mit der Annahme einer punktförmigen Lichtquelle und einem hinreichend großen Abstand von derselben beschreibt das fotometrische Entfernungsgesetz den Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke auf einer Fläche und ihrem Abstand zu einer Lichtquelle. Wie Gleichung 2.6 zu entnehmen ist, hängt die Beleuchtungsstärke E_v vom Quadrat des Abstands r und der winkelabhängigen Lichtstärke I_v ab. Der Zusammenhang lässt sich aus den vorangegangenen Gleichungen 2.1 und 2.4 unter der Annahme eines senkrechten Lichteinfalls folgendermaßen herleiten:

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} = \frac{I_v \cdot \Omega}{A} = \frac{I_v}{r^2} \quad (2.6)$$

2.1.2 Menschliches Sehen

Vereinfachend kann das menschliche Auge als Sensor für elektromagnetische Strahlen im zuvor beschriebenen Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm betrachtet werden [MESC10]. Die dafür verantwortlichen Rezeptoren sind zum einen die sogenannten *Stäbchen*, die die Intensität der Strahlung bestimmen können und bereits bei geringer Umgebungshelligkeit für das Erkennen von Graustufen sorgen. Zum anderen befinden sich für die Erkennung von Farben die sogenannten *Zapfen* im Auge. [SCHM10]

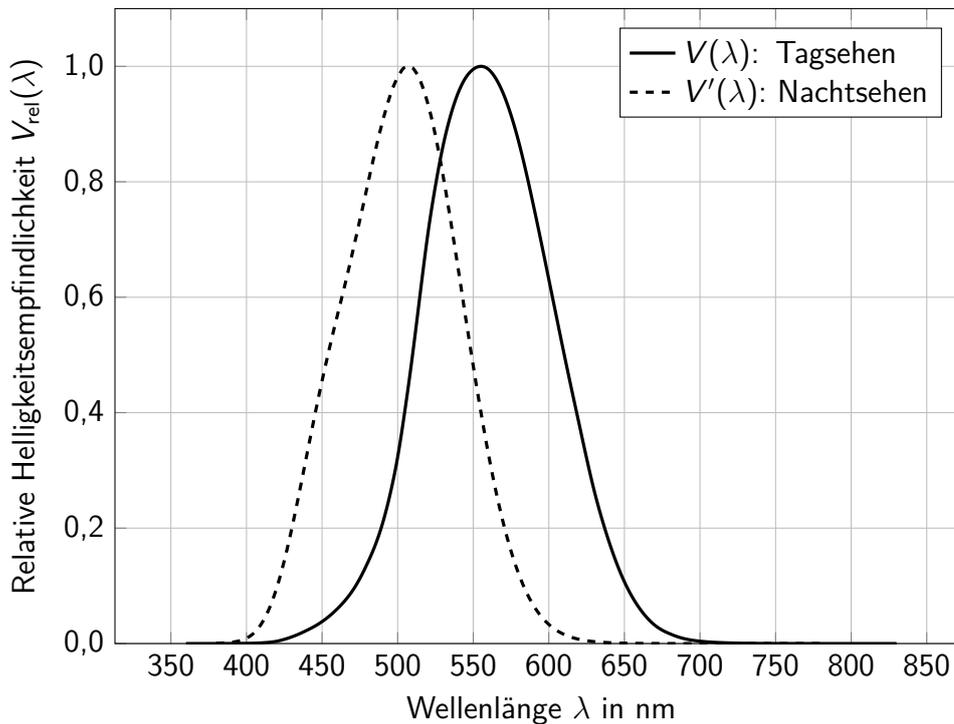


Abbildung 2.1: Helligkeitsempfindlichkeit für Tag- und Nachtsehen nach [CIE1931]

Die Bewertung von Helligkeit und Farbwahrnehmung des Auges wird nach den Richtlinien der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) durchgeführt. In der Realität kann die Wahrnehmung von Versuchspersonen zu abweichenden Helligkeits- und Farbeindrücken führen, was in der ungleichmäßigen Verteilung von Stäbchen und den verschiedenen Zapfen begründet ist. Das Auge reagiert außerdem unter verschiedenen Winkelbereichen unterschiedlich stark auf bestimmte Farben. Bei den Werten der CIE wird unter anderem ein standardisiertes Sichtfeld von 2° für den Betrachter angenommen. [SHAR99], [CIE1931]

Für die Betrachtung der Wirkung von Licht auf das menschliche Auge wird zwischen Tagsehen (photopisches Sehen) und Nachtsehen (skotopisches Sehen) unterschieden. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit sind die Stäbchen hauptsächlich im Bereich des Nachtsehens ak-

tiv, während die Zapfen für das Tagsehen eingesetzt werden. Die relative Helligkeitsempfindlichkeit des Auges ist in Abbildung 2.1 jeweils für den Bereich des Tag und des Nachtsehens über der Wellenlänge aufgetragen. Zwischen dem Tag- und dem Nachtsehen befindet sich ein Übergangsbereich, der als Dämmerungssehen oder auch mesopisches Sehen bezeichnet wird. [SCHM04]

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

Bezeichnung	Umgebungsleuchtdichte L_U in cd/m^2
Tagsehen / photopisches Sehen	$L_U > 10^1$
Dämmerungssehen / mesopisches Sehen	$10^1 > L_U > 10^{-3}$
Nachtsehen / skotopisches Sehen	$10^{-3} > L_U$

Für die Einordnung einer Szene in den Bereich des Tag-, Nacht- oder Dämmerungssehens wird die Leuchtdichte der Umgebung L_U herangezogen. Die entsprechenden Grenzwerte sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Die Ausleuchtung der Straße durch einen Scheinwerfer bei Dunkelheit fällt unter die Definition des Dämmerungssehens [HAFFE11]. Da die Empfindlichkeit des Auges hier mit Änderung der einfallenden Lichtmenge stark variiert, ist dieser Bereich analytisch nicht gut zu bestimmen [KRÜG13]. Aus diesem Grund wird für die Betrachtung von Fahrzeugscheinwerfern und in den entsprechenden Regelungen (siehe dazu Abschnitt 2.3) das Modell des Tagsehens verwendet und auf dessen Grundlage die Bewertung der lichttechnischen Größen vorgenommen. [KHAN15a]

Für die Bewertung des Farbempfindens wird das sogenannte Normvalenzsystem herangezogen, das auf dem zuvor erwähnten 2°-Normbeobachter beruht und von der CIE 1931 als Wertetabelle herausgegeben wurde [CIE1931]. Die dazugehörigen Kurven sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Nach den Wellenlängenbereichen, in denen das Maximum der Empfindlichkeit liegt, werden die Kurven auch mit den zugeordneten Farben rot (\bar{x}), grün (\bar{y}) und blau (\bar{z}) bezeichnet. Sie sind weiterhin normiert auf die maximale Empfindlichkeit im grünen Bereich, die bei $\lambda = 555 \text{ nm}$ vorliegt. Die beiden anderen Kurven sind so skaliert, dass alle drei die gleiche Fläche einschließen.

Unter der Annahme, dass ein Beobachter der zuvor beschriebenen Norm entspricht, kann der für ihn entstehende Farbeindruck mit Hilfe der Empfindlichkeitskurven bestimmt werden. Dazu wird die wellenlängenabhängige Emission $\Phi_{e\lambda}$ einer betrachteten Lichtquelle mit der jeweiligen

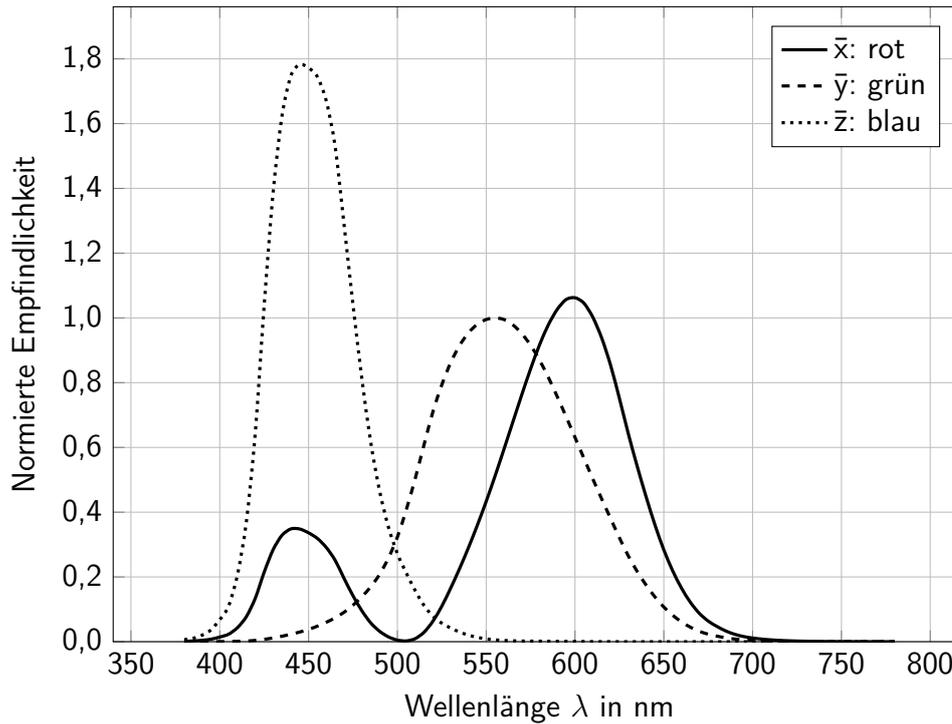


Abbildung 2.2: Empfindlichkeitskurven für Farbsehen im Normvalenzsystem bezogen auf den Normalbeobachter (2°) [CIE1931]

Empfindlichkeit multipliziert und über den spektralen Bereich von 380 nm bis 780 nm integriert. Daraus ergeben sich die integralen Intensitätseindrücke X , Y und Z für die drei Zapfenarten:

$$X = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \bar{x} d\lambda \quad (2.7)$$

$$Y = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \bar{y} d\lambda \quad (2.8)$$

$$Z = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \bar{z} d\lambda \quad (2.9)$$

Nach einer Normierung dieser Werte kann der Farbeindruck unabhängig von der Intensität dargestellt werden. Die normierten Werte werden mit den jeweiligen Kleinbuchstaben x , y und z bezeichnet:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.10)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.11)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.12)$$

Für die zweidimensionale Darstellung des Farbeindrucks werden die Werte x und y herangezogen, da z durch die Normierung bestimmt werden kann über

$$x + y + z = 1. \quad (2.13)$$

Die Werte werden in einer sogenannten Normfarbtafel eingetragen, die ebenfalls von der CIE herausgegeben wird. Sie besteht aus einer Kurve, die die Spektralfarben beinhaltet, wie sie zum Beispiel durch einen Laser näherungsweise erzeugt werden. Eine Verbindungslinie zwischen 380 nm und 780 nm stellt die sogenannte Purpurgerade dar, die den sichtbaren Farbraum abschließt. Die Kurve der Wellenlängen bildet gemeinsam mit der Purpurgerade eine Fläche, innerhalb der sich alle sichtbaren Farben wiederfinden. Eine Abbildung der Farbtafel ist in Abschnitt 6.4 zu finden.

2.1.3 Abstrahlcharakteristiken von Lichtquellen

Für die Abstrahlcharakteristik von ebenen Lichtquellen, wie es beispielsweise die meisten LEDs sind, kann nach SCHUBERT [SCHU06] in guter Näherung das Modell des Lambertstrahlers angenommen werden. Das Modell beschreibt den Effekt, dass die Strahlstärke eines Emitters mit flacher werdendem Emissionswinkel abnimmt.

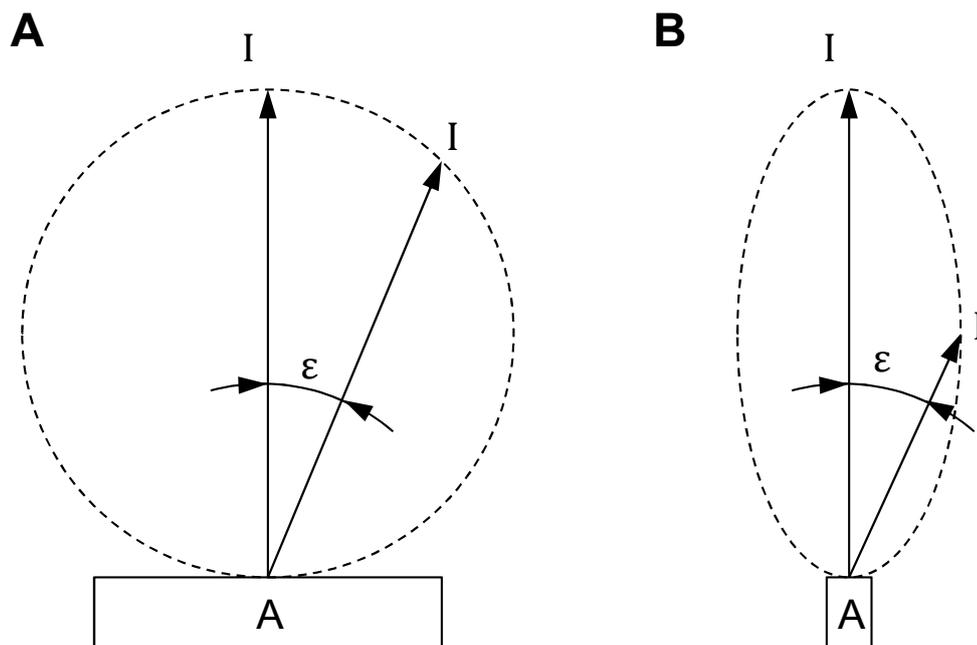


Abbildung 2.3: Abstrahlcharakteristik von Lichtquellen, A) Lambertstrahler, B) Laserdiode

Das Prinzip ist in Abbildung 2.3-A dargestellt. Abhängig vom Winkel ε gilt für die jeweils abgestrahlte Lichtstärke I :

$$I = I_0 \cdot \cos \varepsilon. \quad (2.14)$$

Dabei ist I_0 die normal zur Oberfläche abgestrahlte Bezugslichtstärke. Der Zusammenhang zwischen dem Winkel ε und der resultierenden relativen Lichtstärke I/I_0 ist in Abbildung 2.3 aufgetragen.

In Abbildung 2.3-B ist außerdem beispielhaft das Abstrahlverhalten für eine Laserdiode dargestellt, das sich hinsichtlich der winkelabhängigen Lichtstärke von einem Lambertstrahler unterscheidet. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, verringert sich die Lichtstärke deutlich schneller mit zunehmendem Winkel als dies beim Lambertstrahler der Fall ist. Insbesondere weisen Laserdioden auch zusätzlich unterschiedliche Abstrahlwinkel für die beiden Emissionsrichtungen (parallel und senkrecht zur aktiven Schicht) auf. Dieses Verhalten und die Grundlagen zu Laserdioden und der zugrundeliegenden Lichterzeugung werden in Abschnitt 2.2 näher ausgeführt.

Zur Charakterisierung des Abstrahlverhaltens wird häufig die Halbwertsbreite FWHM verwendet, die für *Full Width at Half Maximum* steht. Sie kennzeichnet die Breite eines Bereichs, in dem die ursprüngliche Intensität auf die Hälfte zurückgegangen ist. Für die Emission von Dioden ist dies beispielsweise der Winkelbereich, in dem sich die Lichtstärke halbiert. Die Angabe einer Halbwertsbreite wird jedoch ebenfalls für die Charakterisierung von Wellenlängenspektren von Halbleiterlichtquellen verwendet.

Für den Lambertstrahler ist die Hälfte der abgestrahlten Lichtstärke bei einem Winkel von $\varepsilon = \pm 60^\circ$ erreicht. Damit ist die FWHM für diesen Fall 120° , was für den Raumwinkel $\Omega = 1\pi$ bedeutet.

Unter Verwendung von Gleichung 3.7 in Kombination mit Gleichung 2.14 kann der Lichtstrom eines Lambertstrahlers für den Halbraum $\Omega = 2\pi$ folgendermaßen bestimmt werden:

$$\Phi_v = \int I_v \, d\Omega = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\varepsilon=0}^{\pi/2} I_0 \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \varepsilon \, d\varepsilon \, d\varphi = I_0 \pi \quad (2.15)$$

2.1.4 Étendue

Bei der Betrachtung von Lichtquellen spielt der abgegebene Lichtstrom eine große Rolle (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.1). Aufgrund von Verlusten im optischen System ist der Lichtstrom, der beispielsweise einen Scheinwerfer verlässt, deutlich geringer als der Lichtstrom der Quelle. Ein relevanter Faktor in der effizienten Auslegung von Beleuchtungssystemen ist die Étendue. Sie ist eine Erhaltungsgröße des Systems und ergibt sich aus der Emissionsfläche einer Lichtquelle sowie dem Raumwinkel, in den Licht abgestrahlt wird. Als Erhaltungsgröße kann sie nicht verlustfrei durch optische Elemente verringert werden. In einem idealen optischen System bleibt sie erhalten, in der Realität wird sie vergrößert, vergleichbar mit der Entropie in einem thermodynamischen System. [CHAV08]

Für den Fall eines idealen optischen Systems ohne Verluste bei der Transmission oder Reflexion an Grenzflächen ist die Étendue G nach CHAVEZ [CHAV08] definiert als

$$dG = n^2 \cdot dA \cdot \cos \varepsilon \cdot d\Omega \quad (2.16)$$

mit der Brechzahl n , die Emissionsfläche A , dem Emissionswinkel ε und dem Raumwinkel Ω , in den emittiert wird.

Liegt eine konstante Lichtabstrahlung für die gesamte Fläche A vor, so dass die Emission ortsunabhängig ist, und kann von einer unveränderlichen Brechzahl n ausgegangen werden, so lässt sich die Formel folgendermaßen vereinfachen [CHAV08]:

$$G = \pi \cdot n^2 \cdot A \cdot \sin^2 \varepsilon. \quad (2.17)$$

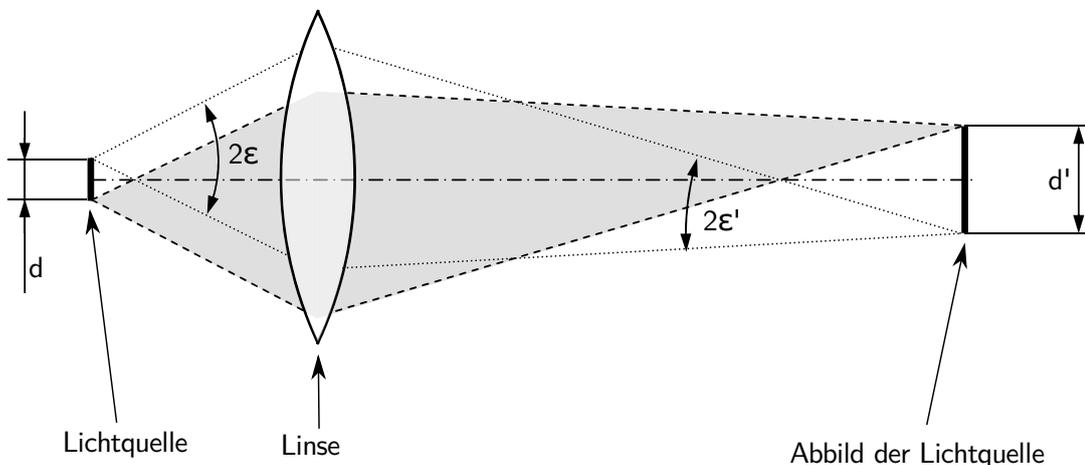


Abbildung 2.4: Étendue in optischen Systemen

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge zeigt Abbildung 2.4 ein einfaches optisches System aus einer Lichtquelle und ihrem durch eine Linse erzeugten Abbild. Für die Winkel ε und ε' gelten nach Gleichung 2.17 folgende Zusammenhänge mit den Durchmessern d und d' :

$$G = \pi^2 \cdot \frac{d^2}{4} \cdot n^2 \cdot A \cdot \sin^2 \varepsilon \quad (2.18)$$

$$G' = \pi^2 \cdot \frac{d'^2}{4} \cdot n^2 \cdot A \cdot \sin^2 \varepsilon'. \quad (2.19)$$

Für ein ideales optisches System ($G = G'$) folgt daraus also

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

Somit kann das Licht der Lichtquelle nur gut gebündelt werden (kleine ε'), indem das Abbild vergrößert wird. Ebenso bedingt eine Verkleinerung des Abbilds eine Vergrößerung des Ausbreitungswinkels. Für ein kleines Abbild bei gleichzeitig kleinem Winkel ε' wäre eine Blende notwendig, die zu Verlusten im Lichtstrom führt.

Bei der Auslegung eines realen Systems sind zusätzlich die Verluste an Grenzflächen zu berücksichtigen. Im Fall eines Übergangs zwischen Luft und unbeschichtetem Glas kann beispielsweise vereinfacht von 4 % Verlust durch Reflexion gemäß der Fresnelschen Formeln ausgegangen werden [DEMT13].

2.2 Laser als Lichtquellen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein auf Laserdioden basierendes System aufgebaut. Die Grundlagen der laserbasierten Lichterzeugung und der farbigen Beleuchtung mit Laserdioden werden dazu in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

2.2.1 Eigenschaften von Laserlicht

Die Bezeichnung Laser ist ein Akronym und steht für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Mit dem Begriff wird sowohl der physikalische Effekt bezeichnet, der die im Weiteren genauer definierte Laser-Strahlung erzeugt, als auch das Gerät, das für deren

Erzeugung eingesetzt wird. Abhängig vom Aggregatzustand des Lasermaterials können Laser nach EICHLER UND EICHLER [EICH15] in vier Gruppen eingeteilt werden:

- Festkörperlaser inklusive Halbleiterlaser
- Flüssigkeitslaser
- Gaslaser
- Freie-Elektronen-Laser

Laser basieren auf der Emission eines aktiven Mediums, das sich innerhalb eines optischen Resonators befindet. Bei Festkörperlaser in Form von Halbleiterlasern ist dieser Resonator durch die teildurchlässigen Reflektorflächen an den Außenflächen des Kristalls gegeben. Durch einen Pumpmechanismus werden im aktiven Medium Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben und erzeugen beim Zurückfallen auf das niedrigere Niveau elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Wellenlänge und Energie. Dieses Zurückfallen wird in dem als stimulierte Emission bezeichneten Prozess angeregt durch im Resonator reflektierte Photonen und ist ein mehrstufiger Prozess. Bei dem Vorgang wird die Strahlung im aktiven Medium verstärkt.

Um aus einem solchen System Laserenergie zu emittieren, muss die Verstärkung der Strahlung größer sein als die Verluste im System. Aus diesem Grund ist eine gewisse Energiedichte erforderlich, die für das Auftreten von Laserstrahlung erreicht werden muss. [HANS02]

Aufbau von Laserdioden

Halbleiterlaser, auch Laserdioden genannt, sind eine spezielle Form von LEDs. Überlegungen zu Halbleiterlasern wurden bereits 1953 von JOHN VON NEUMANN [NEUM87] angestellt, allerdings erst 1987 veröffentlicht. Sie treten somit bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Laserentwicklung in Erscheinung und fanden erste Anwendung im Bereich der Informationstechnologie, beispielsweise in Form von Leseköpfen in CD-ROM-Laufwerken, und in der Nachrichtentechnik [DUPU87].

Die Lichterzeugung in Laserdioden erfolgt im Übergang zwischen einem p- und einem n-dotierten Halbleitermaterial. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung wird eine Besetzungsinversion erzeugt, die in der Erzeugung von Strahlung in Form von stimulierter Emission resultiert. Über die Rekombination von Elektronen und Löchern in der aktiven Zone des Halb-

leiters wird so Energie in Form von Licht erzeugt. Die Endflächen der Schichten bilden dabei einen optischen Resonator mit Reflektivitäten von ca. 30 %, was die Ausbildung einer stehenden Lichtwelle zur Folge hat. [NAUM92]

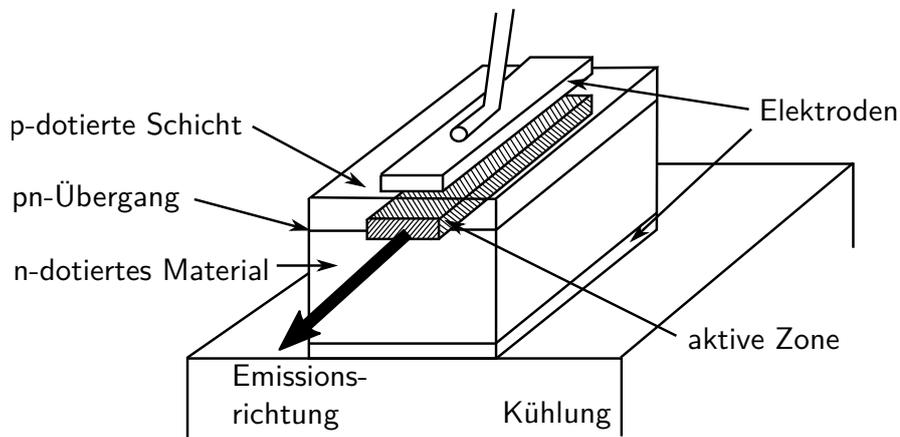


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau einer Laserdiode nach [CHOW99]

Aufgrund dieser Bauweise ermöglichen Laserdioden also die direkte Erzeugung von Laserstrahlung durch die Einbringung von Ladungsträgern, also Elektronen [MESC10]. Eine elektrische Anregung kann somit in die gewünschte Strahlung wie Licht umgewandelt werden. Auf diese Weise ergeben sich gegenüber den anderen zuvor genannten Laserarten die folgenden Vorteile [EICH15]:

- Geringe Baugröße, Abmessungen im Mikro- bis Millimeterbereich.
- Direkte Anregung mit kleinen elektrischen Strömen auch bei geringen Spannungen, so dass der Betrieb mit Batterien und konventionellen Schaltungen möglich ist.
- Kostengünstige Massenfertigung durch Halbleitertechnologie.

Bei der Strahlungserzeugung über Laserdioden erwärmt sich das Halbleitermaterial der Dioden und ändert dabei auch seine Bandstruktur. Diese Änderung führt zu einer Verschiebung der Emissionswellenlänge, was beispielsweise über eine Monitordiode überwacht werden kann. Dies lässt sich über eine aktive Temperaturregelung vermeiden, kann aber auch gezielt für die Erzeugung von Strahlung bestimmter Wellenlängen genutzt werden. [CHOW99]

Die Breite der aktiven Zone resultiert aus der Breite der oberen Elektrode, da eine Besetzungsinversion nur dort stattfinden kann, wo auch elektrische Energie eingebracht wird. Häufig werden für den Diodenaufbau Heterostrukturen von Halbleitern eingesetzt. Diese bieten

gegenüber zu Homostrukturen den Vorteil, dass die Rekombination von Ladungsträgern auf einen sehr schmalen Bereich begrenzt ist. Auf diese Weise ist die Verlustenergie, die in Wärme umgewandelt wird geringer, da Leckströme reduziert sind. [CHOW99]

Ist die Breite der aktiven Zone groß, so entstehen im Laserstrahl einzelne schmale Streifen, die für den Betrachter sichtbar sind. Die Emission ist also nicht im gesamten angegebenen Winkelbereich homogen. Mit einer Steigerung des Anregungsstroms nimmt die Anzahl der Streifen zu, bis der gesamte Abstrahlbereich leuchtet. Grund für die genannte Eigenschaft ist das Auftreten von Inhomogenitäten in der aktiven Zone. [EICH15]

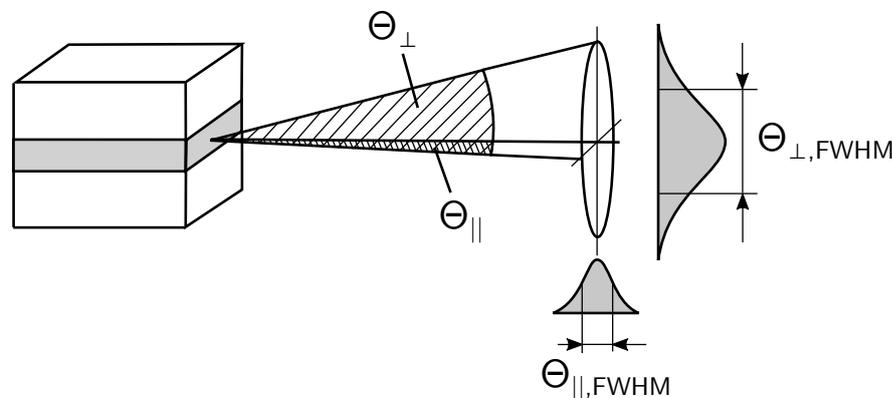


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Strahldivergenz einer Halbleiterdiode nach [MESC10]. Mit der Strahldivergenz senkrecht zur Grenzschicht ($\Theta_{\perp,FWHM}$) und parallel dazu ($\Theta_{\parallel,FWHM}$)

Gegenüber den anderen Bauformen von Lasern verfügen Laserdioden über sehr kleine optische Resonatoren, was zu starken Beugungseffekten an der Austrittsfläche führt. Aus diesem Grund weist die von ihnen emittierte Strahlung eine hohe Divergenz auf und muss mit einem zusätzlichen optischen Element wie einem Kollimator geformt werden. Die Beugungseffekte führen außerdem zu einer elliptischen Strahlform, wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Strahldivergenz senkrecht zur Grenzschicht ($\Theta_{\perp,FWHM}$) liegt für Laserdioden typischerweise bei $25^\circ - 30^\circ$ und ist parallel zur Grenzschicht ($\Theta_{\parallel,FWHM}$) mit $5^\circ - 10^\circ$ deutlich kleiner. [EICH15], [MESC10]

Laserleistung und Wirkungsgrad

Bei der Erzeugung von Strahlung in der aktiven Zone eines Diodenlasers wird die elektrische Energie nicht vollständig in Laserstrahlung umgewandelt. Die übrige Energie wird größtenteils in Wärme umgewandelt und muss aus dem Halbleiter abgeführt werden. Aufgrund der starken

Temperaturabhängigkeit des Laserprozesses und der dabei entstehenden Strahlung ist deshalb in vielen Fällen eine aktive Temperaturregelung am Laser notwendig. Insbesondere bei Hochleistungslaserdioden ist das thermische Management eine große Herausforderung und aus diesem Grund ist die Entwicklung temperaturstabiler Laser Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. [EICH15], [HAGE14]

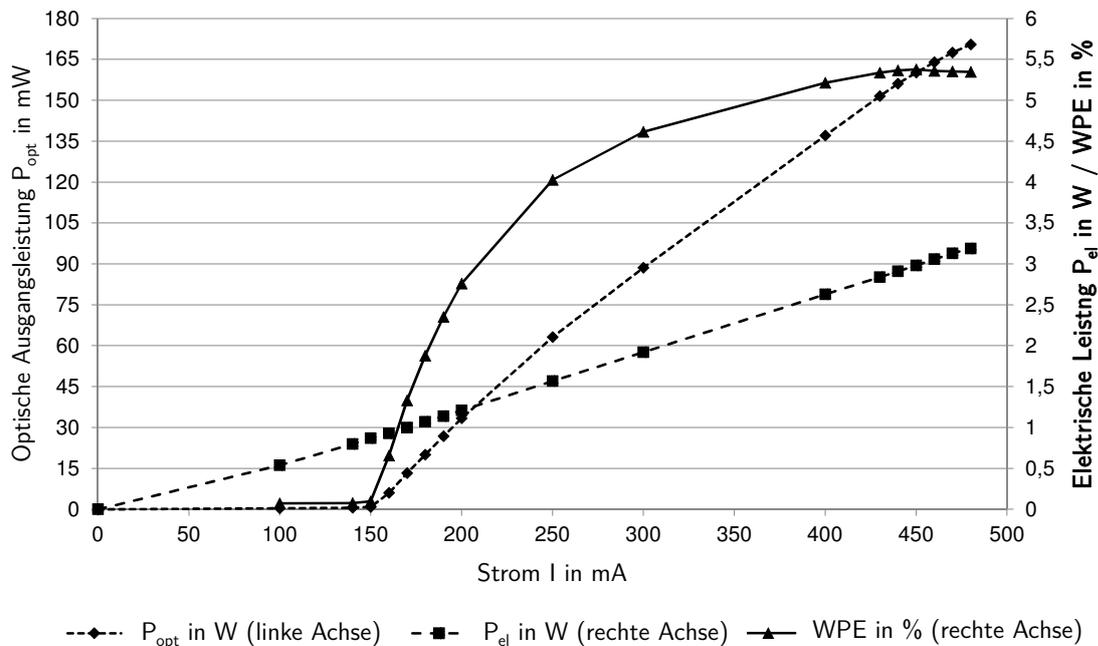


Abbildung 2.7: Zusammenhang zwischen Diodenstrom, Ausgangsleistung und Wirkungsgrad am Beispiel der grünen Diode Osram PLP520

Die thermische Instabilität von Laserdioden führt zu Schwankungen ihres elektrischen Widerstands im Betrieb, was eine Regelung der Diodenleistung über den Strom erfordert. Laserdioden können dazu mit einem kontinuierlichen, konstanten Strom betrieben werden (cw - continuous wave) und zeigen dann statisch das zuvor beschriebene Verhalten der Laseremission. Die abgegebene Laserleistung steigt dabei mit dem angelegten Diodenstrom an und der Wirkungsgrad erreicht ein Optimum. Diese Zusammenhänge sind beispielhaft für die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte grüne Laserdiode in Abbildung 2.7 dargestellt. Dort ist deutlich bei etwa 150 mA Diodenstrom die Laserschwelle zu erkennen, ab der ein steigender Strom auch zu einer sichtbaren Steigerung der Ausgangsleistung führt und außerdem auch die Abhängigkeit der Effizienz der Diode vom Betriebsstrom.

Eine weitere Möglichkeit der Ansteuerung ist der quasikontinuierliche Betrieb (englisch: quasi continuous wave operation), bei dem der Betriebszustand der Diode zwischen dem Auslegungsstrom und dem ausgeschalteten Zustand in schneller Folge gewechselt wird. Auf diese Weise

kann die Emission auf einen Auslegungspunkt zum Beispiel mit maximalem Wirkungsgrad optimiert werden. Um eine Reduzierung der Ausgangsleistung zu erreichen, wird dann das Pulsverhältnis angepasst und nicht wie im cw-Betrieb der Strom geregelt. So kann ein Betrieb in Bereichen mit niedrigem Wirkungsgrad vermieden werden.

Das Verhältnis von Impuls- bzw. Einschaltdauer t_{ein} zur Periodendauer $t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}$ mit der Ausschaltzeit t_{aus} wird als *duty cycle* oder *Tastgrad* bezeichnet. Mit einer gepulsten Ansteuerung ist es zusätzlich zur Reduzierung der Ausgangsleistung möglich, durch höhere Ströme kurzfristig höhere Laserleistungen zu erzeugen als dies im kontinuierlichen Betrieb möglich ist. Für den gepulsten Betrieb werden typischerweise Schaltfrequenzen im Bereich von 1 MHz bis 1 GHz mit Tastgraden zwischen 1 % und 20 % verwendet. [EICH15]

Im Laufe der Betriebszeit von Laserdioden ändert sich laut EICHLER UND EICHLER [EICH15] deren Emissionsverhalten und die optische Ausgangsleistung sinkt bei gleichbleibendem Betriebsstrom. Um diese konstant zu halten, muss somit die Betriebsstromstärke während der Lebensdauer der Diode angepasst werden. Dies erfordert für eine beispielhafte Diode mit einer Emission bei etwa 510 nm nach einer Laufzeit von 5.000 Stunden eine Erhöhung des Betriebsstroms um bis zu 30 % für eine gleichbleibende Emissionsleistung [EICH15].

2.2.2 Weißlicht- und Farberzeugung aus Laserquellen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein System zur Darstellung farbiger Informationen in beliebigen Mischfarben aufgebaut. Ebenso wie LEDs sind Laserdioden vom Aufbau her nicht ohne Weiteres für einen derartigen Einsatz verwendbar. Der Grund dafür ist, dass sie nahezu monochromatisches Licht eines schmalen Wellenlängenbereichs emittieren, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Um mit dieser Abstrahlcharakteristik weitere Farben darstellen zu können, existieren verschiedene Lösungsansätze, die im Folgenden am Beispiel der Erzeugung von weißem Licht vorgestellt werden.

Drei häufig eingesetzte Möglichkeiten sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Die ersten beiden (A und B) verwenden einen Leuchtstoff, der durch das Licht der Diode angeregt wird. Hierzu kann einerseits eine UV-emittierende Diode in Kombination mit einem im sichtbaren Bereich abstrahlenden Leuchtstoff verwendet werden (Variante A), oder auch ein Teil des von einer blauen Diode abgestrahlten Lichts mit einem gelb emittierenden Leuchtstoff gemischt werden

(Variante B). Die dritte Möglichkeit ist die Mischung verschiedenfarbiger Lichtquellen, die dann zusammengenommen die gewünschte Lichtfarbe erzeugen (Variante C).

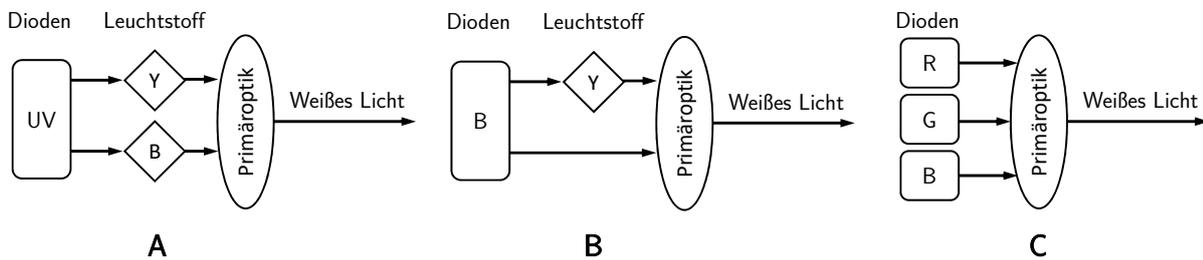


Abbildung 2.8: Möglichkeiten zur Weißlichterzeugung aus Diodenlasern nach [LACH14b]:

- A: Konversion von UV-Licht durch Leuchtstoffe
- B: Konversion von blauem Licht durch Leuchtstoffe
- C: Kombination mehrerer Laserdioden

Die in Abbildung 2.8-A dargestellte Form der Weißlichterzeugung basiert auf dem Konzept der Frequenzkonversion mittels eines Leuchtstoffes. Dazu wird die Emissionsfläche einer im ultravioletten Wellenlängenbereich abstrahlenden Laserdiode auf einen Leuchtstoff abgebildet. Dieser besteht aus einer geeigneten Mischung von Stoffen, die über das Prinzip der *Stokes-Verschiebung* (Stokes-Shift) aus der auftreffenden Strahlung Licht im sichtbaren Bereich erzeugen. [MESC10]

Ähnlich der Variante A ist auch die Variante B aufgebaut. Hier wird das Laserlicht ebenfalls durch einen Leuchtstoff umgewandelt, als anregende Lichtquelle wird hier allerdings eine blau emittierende Diode verwendet. Dieses Konzept wird in den meisten am Markt erhältlichen weißen LEDs angewendet [TIPL15]. Es wird dabei nur ein Teil des Lichts umgewandelt, während ein Anteil des ursprünglichen, blauen Lichts direkt durch den Konverter hindurchgeht. Die Mischung aus dem blauen mit dem konvertierten Licht ergibt die gewünschte Lichtfarbe. Da nur für einen Teil des erzeugten Lichts eine Konvertierung erforderlich ist und wegen der geringeren Energie des blauen Lichts gegenüber der UV-Strahlung, sind bei dieser Variante auch die Verluste durch die Stokes-Verschiebung geringer. [LACH14c]

Im Vergleich zu Variante A mit UV-Strahlung muss bei der teilweisen Nutzung des blauen Lichts für eine gute Durchmischung des konvertierten Lichts mit dem gestreuten blauen Licht gesorgt werden. Insbesondere ist die Abstrahlcharakteristik des Leuchtstoffs mit einem Lambertstrahler beschreibbar, während die Laserdiode sehr gerichtet abstrahlt [WOLF17]. Durch Anpassung der Zusammensetzung des Leuchtstoffs ist eine Einstellung des Farborts und des Farbwiedergabewerts für das emittierte Licht möglich, es ist allerdings mit Alterungseffekten

des Leuchtstoffs zu rechnen, die die Lichtfarbe beeinflussen. Nach JÜSTEL [JÜST13] treten diese Alterungseffekte besonders stark bei der Verwendung von UV-Strahlung auf und müssen gegebenenfalls durch eine Anpassung der Lichtquellenansteuerung über die Lebensdauer des Systems kompensiert werden.

Die beiden auf Leuchtstoffen basierenden Verfahren finden insbesondere bei weißen LEDs Anwendung, hier wird der Leuchtstoff in den meisten Fällen in Form eines vergossenen Polymers oder einer Keramik direkt auf der Emissionsfläche der Diode aufgebracht. Dabei werden bei den weißen LEDs häufig blau emittierende Dioden in Kombination mit einem Leuchtstoff eingesetzt, während ein durch UV-Strahlung angeregter Leuchtstoff in Leuchtstoffröhren Anwendung findet.

Im Gegensatz zu LEDs ist der Leuchtstoff bei Laserdioden räumlich getrennt von der Emissionsfläche angebracht, der Systemaufbau wird als *Remote-Phosphor* bezeichnet [FIED15a]. HANAFI ET AL. [HANA13] weisen für diese Form der Lichterzeugung eine erhöhte Effizienz nach, da so eine Selbstabsorption des nach hinten emittierten Lichts durch den Halbleiterchip vermieden werden kann. Um dies sinnvoll zu nutzen sind jedoch zusätzliche Maßnahmen wie etwa eine dichroitische Beschichtung erforderlich. Diese bewirkt, dass das anregende Licht durch die Schicht zum Leuchtstoff gelangen kann, das umgewandelte Licht hingegen wird reflektiert und somit dem nutzbaren Lichtstrom hinzugefügt. Ein weiterer Vorteil der entfernten Anordnung von Diode und Leuchtstoff ist die Trennung der Wärmequellen von Lichterzeugung und Lichtkonversion, was mit einem angepassten thermischen Konzept zu einer höheren Systemeffizienz führt [FIED15a].

Das durch den Leuchtstoff erzeugte Licht weist nicht mehr die für Laserlicht typische Kohärenz auf und muss unter diesen Bedingungen auch nicht als Laserquelle betrachtet werden. Bei der Verwendung einer UV-Diode kann das verbliebene, nicht umgewandelte Laserlicht durch einen Filter hinter dem Leuchtstoff einfach aus dem Lichtstrom entfernt werden, so dass das erzeugte Licht nur noch auf den Leuchtstoff zurückzuführen ist.

Eine weitere Eigenschaft der Konversion ist die zuvor erwähnte Umwandlung von schmalbandigem, nahezu kohärentem Licht in ein breiteres Spektrum. Durch die Wahl der Leuchtstoffmischung kann das emittierte Spektrum an die gewünschten Eigenschaften hinsichtlich Lichtfarbe und Farbwiedergabeindex angepasst werden. Der Verlust durch die Stokes-Verschiebung muss dabei berücksichtigt werden.

Die dritte Variante (Abbildung 2.8-C) verwendet die Emission verschiedenfarbiger Laserdioden um direkt daraus das Licht mit den gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. Dies ist im Beispiel für eine Farbmischung aus drei Dioden in den Farben rot, grün und blau dargestellt. Da bei diesem Konzept kein Konverter verwendet wird, bleiben die Lasereigenschaften, wie beispielsweise die gerichtete Emission der Dioden, erhalten. Aufgrund der sehr geringen Étendue von Laserlichtquellen ist außerdem die Strahlformung sehr effizient möglich und das optische System kann klein gehalten werden [BASU13b], [WOLF17].

Theoretisch reicht für die Erzeugung von weißem Licht aus Laserdioden die Kombination von blauen und gelben Dioden aus. Um den Farbort in weiten Bereichen einstellen zu können, sind jedoch mindestens drei Dioden notwendig, die üblicherweise in den Farben rot, grün und blau eingesetzt werden. Die resultierende Farbe wird im von der CIE [CIE1931] definierten Farbraum dargestellt (in Abschnitt 2.1.2 weiter ausgeführt). Die Punkte für die Ausgangsfarben rot, grün und blau liegen darin so, dass ein durch sie aufgespanntes Dreieck einen sehr großen Teil des Farbraums abdeckt. Durch Variation der Intensitäten einzelner Laserdioden lassen sich dann alle Mischfarben innerhalb des durch die drei Farbpunkte aufgespannten Dreiecks erzeugen.

Die direkte Verwendung des Laserlichts bietet somit die Möglichkeit, im Betrieb die Farbe anzupassen, ohne das System beispielsweise durch einen Wechsel des Leuchtstoffs zu verändern. Auf der anderen Seite hat das emittierte Licht weiterhin alle Eigenschaften einer Laserdiode, ist also kohärent und führt deshalb unter Umständen zu Speckles im Lichtbild.

Speckles sind eine Interferenzerscheinung von kohärentem Licht auf einer betrachteten Oberfläche oder der Netzhaut und erscheinen dabei als zufälliges Muster von hellen und dunklen Lichtpunkten. Anders als die geometrisch klar beschreibbare Interferenz von Wellenfronten beispielsweise als Folge von Beugung, entstehen Specklemuster stochastisch. Dieses Verhalten ist auf die nicht definierte Phasenbeziehung der interferierenden Strahlen zurückzuführen. In der Literatur wird unterschieden zwischen der Speckleentstehung durch Lichtstreuung an einem Objekt auf einer Oberfläche (Objektives Speckle, Fernfeld-Speckle) und der in einem abbildenden optischen System (Subjektives Speckle, Nahfeld-Speckle). Mathematisch können beide Effekte weitestgehend gleich behandelt werden. [ASAK78]

Im Vergleich zu den Varianten A und B mit leuchtstoffbasierter Weißlichterzeugung ist der Farbwiedergabewert bei der Nutzung direkter Laserstrahlung geringer, da Laserdioden nur in einem sehr kleinen Wellenlängenbereich um eine dominante Wellenlänge herum Strahlung emit-

tieren. Für einen hohen Farbwiedergabewert ist jedoch ein kontinuierliches, breites Spektrum erforderlich [BASU13a]. Um mit Laserdioden Licht mit einem hohen Farbwiedergabewert zu erzeugen, zeigt NEUMANN [NEUM11] die Mischung von vier Dioden als Lösung auf, bei der zusätzlich zu rot, grün und blau eine gelbe Diode eingesetzt wird.

Bei der Nutzung direkter Laserstrahlung muss außerdem die Augensicherheit in Bezug auf das austretende Laserlicht berücksichtigt werden. Anders als bei den auf Leuchtstoffen basierenden Konzepten ist auch ein optisches System für eine gute Durchmischung der verschiedenfarbigen Laser essentiell. Im Gegensatz zu den Konverterstoffen, die jeweils für die Anwendung individuell angepasst werden müssen, stehen für die Strahlkombination von Lasern jedoch Standardkomponenten und -verfahren zur Verfügung [FAN05].

2.3 Fahrzeugscheinwerfer

Beginnend mit den gesetzlichen Randbedingungen für Fahrzeugscheinwerfer in Europa werden nachfolgend aktuelle Ansätze von Scheinwerfersystemen vorgestellt, die im Bereich der hochauflösenden Scheinwerfer eingeordnet werden können oder Laserlichtquellen verwenden.

2.3.1 Gesetzliche Randbedingungen für Frontscheinwerfer

Für die Zulassung von Fahrzeugscheinwerfern für den europäischen Raum und auch für weite Teile der restlichen Welt werden die Regelungen der UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) zugrunde gelegt. In Bezug auf Scheinwerfer beinhalten diese neben Bestimmungen zu deren Art, Ausführung und Anbringung auch Vorgaben zu den lichttechnischen Anforderungen.

Wichtiger Aspekt ist an dieser Stelle vor allem die Vorgabe der Lichtverteilungen für das Abblendlicht motorisierter Fahrzeuge. In Regelung 8 [ECE8] ist dieses beispielsweise für Halogenlichtquellen angegeben. Dazu wird ein Messschirm in 25 m vor dem Fahrzeug definiert und angeleuchtet. Daraufhin ergeben sich auf dem Schirm Zonen verschiedener Helligkeiten, die anhand von Messpunkten auf vorgegebene Grenzwerte hin geprüft werden. Eine Darstellung des Messschirms mit den für den Rechtsverkehr definierten Punkten ist in Abbildung 2.9 gezeigt. Neben der Definition bestimmter Mindesthelligkeiten zum Beispiel für den Punkt 50L oder die

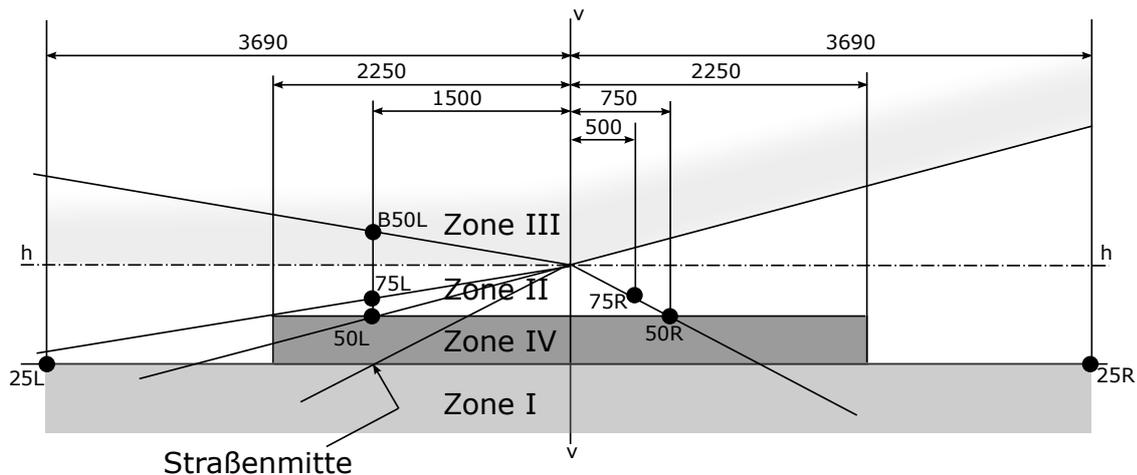


Abbildung 2.9: Abblendlichtverteilung für den Rechtsverkehr nach UNECE R8 [ECE8]

Zone IV sind außerdem Maximalwerte für die Beleuchtungsstärke festgelegt. Dies ist beispielsweise für Zone III der Fall und dort insbesondere für den Punkt B50L. Als Referenz für die benannten Punkte dient der Schnittpunkt zwischen der horizontalen Achse des Scheinwerfers (h-h) und der vertikalen Achse (v-v). Dieser Punkt wird mit HV bezeichnet [ECE8].

Im Zuge der Weiterentwicklung von Scheinwerfern und Lichtquellen sind auch die Richtlinien der UNECE in den vergangenen Jahrzehnten angepasst und erweitert worden. So existieren mit den Regelungen 98 und 112 [ECE98], [ECE112] Vorgaben für Xenon- und LED-Lichtquellen und auch zusätzliche Funktionen sind aufgeführt, wie beispielsweise Abbiegelicht oder Nebelscheinwerfer in den Regelungen 12 und 119 [ECE119], [ECE12]. Ein von der Fahrsituation abhängiges Licht, das zum Beispiel zwischen Stadt- und Überlandfahrt unterscheidet und weitere adaptive Funktionen beinhalten kann, ist in Regelung 123 [ECE123] definiert. Insbesondere die Grenze zwischen den hellen und dunklen Bereichen, also zwischen Zone II und Zone III in Abbildung 2.9, wird dort weiter detailliert und an die Möglichkeiten von Freiformreflektoren und LED-Lichtquellen angepasst.

Neben der Lichtverteilung ist auch der Farbort des emittierten Lichts definiert. Dies erfolgt in Regelung 48 [ECE48], die festlegt, dass Scheinwerfer nur weißes Licht abgeben dürfen. Die Definition von Weiß und der damit zugelassene Bereich für Frontscheinwerfer ist über einen festgelegten Bereich in der CIE-Farbtabelle definiert. Für zusätzliche Funktionen, die eine andere Lichtfarbe benötigen oder haben sollen, müssten weitergehende Regelungen getroffen werden.

2.3.2 Hochauflösende Scheinwerfersysteme

Höchauflösende Scheinwerfersysteme, mitunter auch Pixellicht-Systeme genannt, sind aktuell Gegenstand von Forschung und Entwicklung in der Automobilbeleuchtung. Mit dem Begriff werden Systeme mit einer Auflösung über 10.000 Pixel beschrieben [WOLF17]. Grundsätzlich werden dabei zwei Ziele verfolgt, zum einen die Projektion von Informationen in den Verkehrsraum zur Unterstützung des Fahrers und des Fahrzeugumfelds und zum anderen die optimale Ausleuchtung des Verkehrsraumes. [KLOP16b], [GÜNT10]

Erster Schritt bei der Umsetzung hochauflösender Scheinwerfer ist die Umsetzung der angepassten Ausleuchtung des Verkehrsraums, da hierfür gegenüber der Informationsprojektion eine geringere Auflösung erforderlich ist und die Lichtströme bereits verfügbarer Lichtquellen für die Ausleuchtung einer nächtlichen Straße ausreichend sind. Die Informationsprojektion hingegen erfordert eine größere Anzahl an Bildpunkten und soll in möglichst vielen Verkehrssituationen einsetzbar sein.

Ziel der angepassten Ausleuchtung des Verkehrsraums ist es unter anderem, Fahrer entgegenkommender Fahrzeuge aus der eigenen Lichtverteilung optimal auszublenden, gleichzeitig aber einen größtmöglichen Bereich der Fahrbahn und ihrer Umgebung auszuleuchten. Weiterhin können beispielsweise Verkehrsschilder mit reduzierter Lichtstärke angestrahlt werden, so dass der von JÜRGENS [JÜR15] beschriebene kontrastadaptive Scheinwerfer umgesetzt wird. Auch die Reflexion an Pfützen kann vermieden werden um so eine Reduzierung der Blendung entgegenkommender Fahrzeuge zu erreichen [FISC15].

In Probandenstudien mit serienmäßig verfügbaren Scheinwerfer mit adaptiven Lichtfunktionen konnte bereits gezeigt werden, dass die angepasste Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer aus der Lichtverteilung zu einer vermehrten Nutzung des angepassten Fernlichts und damit zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit führt [BÖHM09].

Lichtquellen und Scheinwerfer für diese Funktionen werden gegenwärtig unter anderem im Rahmen einer Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in drei unterschiedlichen Projekten erforscht. Es handelt sich dabei zum einen um das Projekt μ AFS, das die Umsetzung eines LED-Chips mit 1.024 individuell ansteuerbaren Elementen beinhaltet. Aus mehreren solcher Lichtquellen sowie einer zusätzlichen Erhöhung der Elementzahl lässt sich ein hochauflösender Scheinwerfer aufbauen [GRÖT15]. Im Projekt VoLiFa2020 wird ein

LCD entwickelt, das ca. 30.000 schaltbare Bildpunkte erzeugen kann und mit einer geeigneten Lichtquelle direkt als hochauflösender Scheinwerfer eingesetzt werden kann [HESS15a], [HESS15b], [REIN17]. Das dritte Projekt mit dem Namen ILaS behandelt den Aufbau eines scannenden Systems bestehend aus einem blauen Laser, einem Mikrospiegel und einem Leuchtstoff, über den der Laser geführt wird, um so die Bildpunkte zu erzeugen [GUT16].

Mit einigen dieser Systeme ist nach deren Fertigstellung zusätzlich zur angepassten Ausleuchtung des Verkehrsraums auch die Darstellung von Assistenzinformationen in Form von Hell-Dunkel-Bildern möglich. Darüber hinaus soll das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte System auch die Projektion farbiger Symbole ermöglichen. Bereits verfügbare Projektoren aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik verfügen entweder nicht über die erforderliche Abstrahlleistung für diesen Zweck oder sind zu groß oder zu störanfällig für den Einsatz im Fahrzeug.

Herausforderung der aktuellen Forschung ist es, die hohe Auflösung in Kombination mit einer entsprechend hellen Lichtquelle für die zuvor beschriebenen Lichtfunktionen zu erreichen [ROTH15]. Aus diesem Grund werden die darzustellenden Symbole im ersten Schritt mit einem separaten Modul erzeugt. Zusätzlich dazu wird eine Grundlichtverteilung mit einem statisch ausleuchtenden Scheinwerfermodul umgesetzt und die Informationsprojektion erfolgt additiv zu dieser Lichtverteilung. Die notwendigen Eigenschaften für ein derartiges Projektionssystem werden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt, dabei werden insbesondere auch die benötigten Lichtströme bestimmt.

Zur Erhöhung der Erkennbarkeit von Informationen ist die Farbprojektion in Kombination mit der Nutzung bekannter Symbole sehr sinnvoll, weshalb für die weiteren Überlegungen im Rahmen dieser Arbeit die Farbprojektion angestrebt wird [ROTH15]. Mit dem aufgebauten Modul können dann in folgenden Schritten Untersuchungen zur Art der darzustellenden Funktionen angestellt werden.

Ein Vergleich der Technologien hochauflösender Scheinwerfer mit Blick auf die Darstellung von Fahrerassistenzinformationen erfolgt in Kapitel 4.

2.3.3 Laserbasierte Fahrzeugscheinwerfer

Laserdioden als Lichtquelle in Fahrzeugscheinwerfern sind zuerst in den Fahrzeugen Audi R8 LMX und BMW i8 serienmäßig eingesetzt worden, bei BMW folgte bald darauf auch die Einfüh-

rung in weiteren Fahrzeugmodellen. Die Laserdioden sind dabei als Zusatzausstattung wählbar und werden für ein sogenanntes Zusatzfernlicht eingesetzt. Ist das Fernlicht eingeschaltet und fährt das Fahrzeug außerdem schneller als eine definierte Grenzgeschwindigkeit, so wird das Lasermodul aktiviert um die Reichweite des Fernlichts zu erhöhen. Weitere Einsatzszenarien für Lasermodule sieht BMW in der Anwendung als Markierungslicht um den Fahrer auf Gefahrenstellen hinzuweisen. Werden sie von der Fahrzeugsensorik erkannt, so wird das Lichtmodul auf die Stelle ausgerichtet und hebt diese so für den Fahrer hervor. [FIED15a], [BASU13a], [LACH14a]

Solche Lasermodule erzeugen einen vergleichsweise kleinen Lichtpunkt hoher Intensität vor dem Fahrzeug. Die als Zusatzfernlicht verfügbaren Ausführungen bestehen aus drei beziehungsweise vier Laserdioden, die über ein optisches System zu einem Strahl kombiniert und dann auf einen Leuchtstoff gelenkt werden. Aus dem dabei entstehenden weißen Licht wird mit Hilfe einer geeigneten Optik die gewünschte Lichtverteilung erzeugt. [GUT14a]

Mit den Lasermodulen in Serienfahrzeugen ist somit eine sehr spezielle Form der Umsetzung verfügbar, die keine Funktion eines hochauflösenden Scheinwerfers beinhaltet. Vielmehr wird die kleine Emissionsfläche der Laserdioden und die damit einhergehende hohe Energiedichte ausgenutzt. [FIED15b], [LACH14a], [GUT14a]

2.4 Head-Up-Displays

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.3 genannten Funktionen zielen Head-Up-Displays nicht auf eine Ausleuchtung des Verkehrsraumes ab. Vielmehr dienen sie als Unterstützung des Fahrers in Form einer zusätzlichen Anzeige von Informationen in seinem Blickfeld.

Head-Up-Displays bestehen üblicherweise aus einer Projektionseinheit, die das gewünschte Bild erzeugt, und einem Anzeigeelement. Die Projektionseinheit beinhaltet eine Lichtquelle, zum Beispiel LEDs oder Laserdioden, und einen Bilderzeuger, beispielsweise einen LCD oder einen Mikrospiegel, wie sie in Abschnitt 4.1 beschrieben werden. Als Anzeigeelement dient entweder eine eigene, mit dem System verbundene Glasscheibe oder auch die Windschutzscheibe des Fahrzeugs. Das erzeugte Bild wird auf diese Scheibe projiziert und scheint dann für den Fahrer in der Luft vor dem Fahrzeug zu schweben. Im direkten Vergleich zu LED-Lichtquellen kann

bei der Verwendung von Laserdioden nach HANAFI ET AL. [HANA10] aufgrund der hohen Leuchtdichte eine gute Sichtbarkeit der Darstellungen auch bei Tag gewährleistet werden.

Die Anbringung der gesamten Head-Up-Display-Einheit im Fahrzeug erfolgt so, dass die Anzeige in der Blickrichtung des Fahrers zwischen ihm und der Straße liegt. Im Fall einer eigenen Projektionsscheibe kann die Position der Scheibe auf die Kopfposition des Fahrers angepasst und das Bild so optimal eingestellt werden. Die Projektionsgröße ist dabei abhängig von der Größe der Anzeigescheibe. Eine Projektion auf die Windschutzscheibe erlaubt somit die Darstellung wesentlich größerer Bilder, benötigt jedoch gleichzeitig einen größeren Bauraum für das dafür eingesetzte optische System.

Eine Untersuchung zur Aufmerksamkeit des Fahrers und dessen Blickrichtung beim Einsatz von Head-Up-Displays wird von GENGENBACH [GENG97] durchgeführt. Hier werden die Reaktionen der Fahrer auf projizierte Geschwindigkeitsanzeigen mit den Fixationen auf die klassische Tachoanzeige verglichen. Ein entscheidender Faktor bei der Bewertung der Systeme ist dabei die Blickabwendezeit, die im Fall des Tachometers für die Studie um 42 % (178 ms) größer war als beim Head-Up-Display, und so von einer geringeren Ablenkung für den Fahrer ausgegangen werden kann.

Für den optimalen Einsatz von Head-Up-Displays wird eine sogenannte kontaktanaloge Darstellungsform angestrebt. Das bedeutet, dass die dargestellten Zeichen und Informationen für den Fahrer mit der Umgebung verbunden zu sein scheinen. Eine projizierte Fahrspurmarkierung für die Zielspur könnte so an die tatsächliche Fahrbahnmarkierung angepasst werden. Um dies zu erreichen muss für das erzeugte Bild allerdings die exakte Augenposition und Blickrichtung des Fahrers bekannt sein. Ist dies nicht der Fall, erscheint das Bild für den Fahrer schon bei kleinen Kopfbewegungen versetzt. Untersuchungen zur Umsetzung von kontaktanalogen Head-Up-Displays durch POITSCHKE ET AL. [POIT08] zeigen, dass die Darstellungsweise gegenüber herkömmlichen Head-Up-Displays große Vorteile in der Erkennbarkeit von Informationen bietet. Gleichzeitig führen die angezeigten Informationen laut der Studie bei einem Großteil der Probanden nicht zu einer Ablenkung vom Verkehrsgeschehen.

Die kontaktanaloge Darstellungsweise wird insbesondere im Hinblick auf autonomes Fahren als wichtiges Element zur Kommunikation des Fahrzeugs mit dem Fahrer gesehen und kann so zur Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen beitragen [DAMB12].

Das für diese Arbeit angestrebte System beinhaltet die Vorteile eines Head-Up-Displays im Hinblick auf die kontaktanaloge Darstellung farbiger Informationen. Gleichzeitig entfallen die Nachteile, dass ein Tracking des Fahrerkopfes erforderlich ist und dass eine große Projektionsfläche sehr aufwendig umzusetzen ist. Anders als bei Head-Up-Displays sind auf die Straße projizierte Informationen jedoch gegebenenfalls auch für andere Verkehrsteilnehmer sichtbar, so dass hier weitere Untersuchungen erforderlich sind.

3 Funktionsumfang und Anforderungen an die scannende Laserprojektion

Die zuvor beschriebenen Entwicklungen hochauflösender Scheinwerfer ermöglichen gegenüber herkömmlichen Lichtsystemen eine Vielzahl neuartiger Funktionen. Während einige Systeme auf die angepasste Ausleuchtung des Verkehrsraumes abzielen, soll im Rahmen dieser Arbeit ein Modul entwickelt werden, das eine Informationsdarstellung in einem gezielt ausgewählten Bereich vor dem Fahrzeug ermöglicht. Aus diesem Ziel ergeben sich Anforderungen, die in den folgenden Abschnitten weiter ausgearbeitet werden.

In Abschnitt 3.1 wird zunächst ein Überblick über Fahrerassistenzfunktionen mit einem Fokus auf der Informationsdarstellung gegeben. Die vorgestellten Funktionen werden für die Erarbeitung der weiteren Anforderungen herangezogen und außerdem für den Vergleich des aufgebauten Prototypen mit anderen Technologien für hochauflösende Scheinwerfersysteme verwendet.

Dazu erfolgt zunächst die Bestimmung der erforderlichen lichttechnischen Kenngrößen des scannenden Moduls und die Definition des Projektionsbereichs. Zielbereich für die Projektion soll die Straße vor dem Fahrzeug sein. Auf diese Weise werden einige Einschränkungen beim Einsatz von Head-Up-Displays vermieden. Diese sind in Abschnitt 2.4 weiter ausgeführt und bestehen einerseits darin, dass eine kontaktanaloge Darstellung nur möglich ist, wenn die Kopfposition des Fahrers bekannt ist. Zum anderen erfordert eine große Projektionsfläche ein entsprechend großes optisches System. Die direkte Projektion bietet zusätzlich den Vorteil, dass die projizierte Information mit der Fahrzeugkamera erfasst und bei Bedarf angepasst werden kann. Das System lässt sich somit online kalibrieren.

Für eine gute Sichtbarkeit und große Vielfalt der dargestellten Informationen wird außerdem eine Farbdarstellung vorgesehen. Die Herleitung der entsprechenden Anforderungen erfolgt in Abschnitt 3.2.3 für die Farbdarstellung und in Abschnitt 3.2.4 für die Auflösung.

Weitere konstruktive und elektrische Anforderungen an das Projektionssystem werden in den beiden darauffolgenden Abschnitten behandelt.

3.1 Fahrerassistenzfunktionen

Fahrerassistenzsysteme sind in aktuellen Fahrzeugen in zunehmendem Maße vorhanden und unterstützen den Fahrer an vielen Stellen. Insbesondere auf dem Weg zum autonomen Fahren stellen sie einen wichtigen Forschungs- und Entwicklungsgegenstand dar [WINN12]. Mit den in Abschnitt 2.3.2 aufgeführten Forschungsarbeiten im Bereich der hochauflösenden Fahrzeugscheinwerfer lassen sich über die reine Ausleuchtung der Fahrbahn hinaus verschiedene weitere Funktionen realisieren, die in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert werden. Die lichttechnischen Systeme leisten auf diese Weise einen Beitrag zur Unterstützung des Fahrers und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, weshalb sie zu den Fahrerassistenzsystemen gezählt werden können. Adaptive Scheinwerfer werden beispielsweise im Rahmen der eSafety-Initiative der europäischen Kommission neben ESP, Spurhalte- und Notbremsassistent als sicherheitsrelevante Assistenzsysteme aufgeführt [AMSE10].

Nach KNOLL [KNOLL10] lassen sich Fahrerassistenzsysteme in aktive und passive Systeme einteilen. Während die aktiven Systeme direkt in die Fahrzeugdynamik eingreifen, sollen die passiven eine Reaktion des Fahrers bewirken. Die lichttechnischen Fahrerassistenzsysteme können prinzipbedingt nur für passive Assistenzfunktionen genutzt werden. Weiterhin wird von KNOLL [KNOLL10] eine Klassifizierung in die folgenden Kategorien vorgenommen:

- Fahrerinformationssysteme
- Fahrzeugkommunikationssysteme
- Prädiktive Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme
- Systeme zur Fahrzeugstabilisierung
- Kombination aktiver und passiver Sicherheitssysteme.

In den drei Kategorien Fahrerinformationssysteme, Fahrzeugkommunikationssysteme und Sicherheitssysteme lassen sich lichttechnische Funktionen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Beleuchtungssysteme wiederfinden. Dazu werden einzelne Funktionen im Folgenden herausgearbeitet und ihre Anwendung eingeordnet. Abschließend erfolgt eine Festlegung auf

relevante Funktionen, für deren Umsetzung das in dieser Arbeit untersuchte System ausgelegt werden soll.

Die Klassifizierung durch KNOLL [KNOL10] beinhaltet den Begriff *Sicherheitssysteme* und für die dazugehörigen Funktionen ist somit eine Definition des Begriffs im Kontext der Fahrzeugtechnik erforderlich.

Ein System kann nach GELAU ET AL. [GELA12] als Sicherheitssystem betrachtet werden, wenn es einen direkten Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leistet. Für die Abschätzung des Beitrags zur Verkehrssicherheit sind dabei verschiedene Herangehensweisen möglich. Die gebräuchlichste Methode ist es, Unfälle im Nachhinein dahingehend zu analysieren, welche Maßnahmen zu ihrer Vermeidung oder zumindest zur Verringerung der Auswirkungen geführt hätten. [GELA12]

Die Ermittlung von Fahrerassistenzsystemen zur effektiven Reduzierung von Verkehrstoten wurde durch die Europäische Kommission an ein Expertengremium übertragen, das die nachfolgend genannten Fahrzeugsysteme als relevant für die Verkehrssicherheit ermittelt hat [GELA12]:

- Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)
- Überwachung des toten Winkels
- Adaptives Abblendlicht
- Hindernis- und Kollisionswarnung
- Spurassistent (Lane Departure Warning)

Lichttechnische Systeme, die entsprechende Funktionen aufweisen, lassen sich somit nach der zuvor aufgeführten Klassifizierung von KNOLL [KNOL10] in den Bereich *Prädiktive Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme* einzuordnen.

Während Scheinwerfersysteme, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, auf die Darstellung von Hell-Dunkel-Bildern ausgelegt werden, wird für die vorliegende Arbeit darüber hinaus die Projektion farbiger Informationen betrachtet. Auf diese Weise eröffnet sich eine Vielzahl weiterer Darstellungs- und Informationsmöglichkeiten. Dies sind beispielsweise die in Abbildung 3.1 eingezeichneten Symbole, die eine ähnliche Form besitzen, wie KRAHNSTÖVER ET AL. [KRAH16] sie zur Signalisierung von Fahrmanövern verwenden. Zur

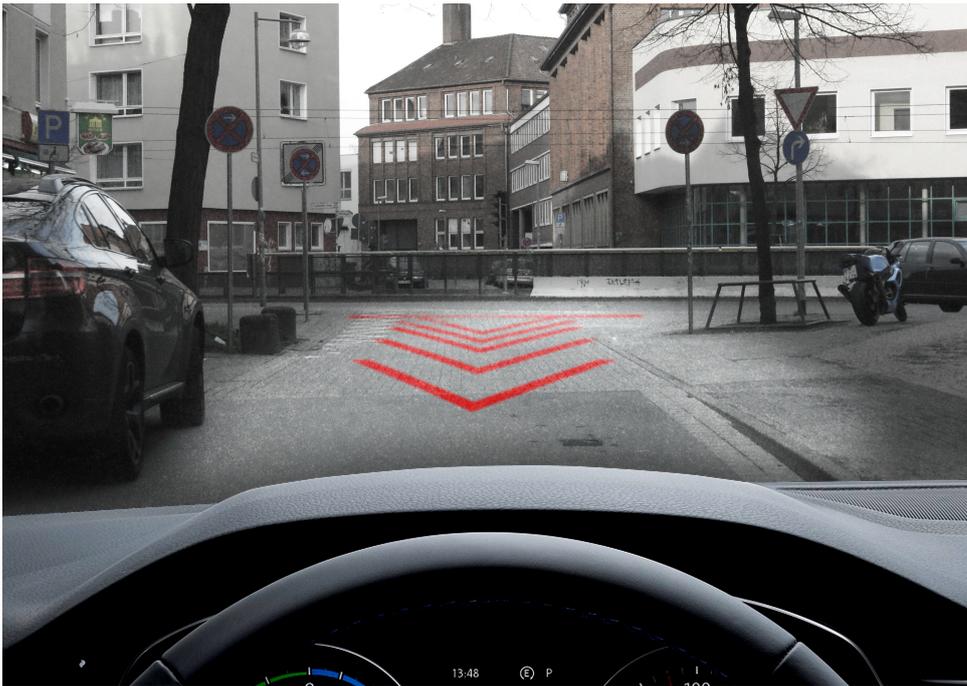


Abbildung 3.1: Beispielsignale für eine Bremssituation

besseren Erkennbarkeit und um den Fahrer auf sie aufmerksam zu machen, sollen sie farbig dargestellt und dynamisch bewegt werden.

Ein Projektionssystem eröffnet außerdem die Möglichkeit, dem Fahrer während der Fahrt die Informationen aus seinem Navigationssystem in den Verkehrsraum zu projizieren. So ist eine Blickabwendung auf ein kleines Display oder auch auf eine im Head-Up-Display angezeigte Information vermeidbar. Beispielhaft ist in Abbildung 3.2 eine Darstellung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in die Verkehrssituation eingefügt.

Eine weitere mögliche Funktion ist ein dynamischer Spurassistent, der optisch die zu Verfügung stehende Spur markiert und gegebenenfalls warnt, wenn das Fahrzeug breiter ist als die Fahrspur. Diese Funktion kann insbesondere in Baustellen einen erheblichen Vorteil für den Fahrer bringen.

Insbesondere im Hinblick auf autonom fahrende Fahrzeuge ist auch die Kommunikation des Fahrzeugs mit seiner Umgebung ein wichtiger Aspekt. Diese Kommunikation kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, unter anderem auch über die Fahrzeugscheinwerfer. Ein hochauflösender Scheinwerfer kann Fußgängern beispielsweise signalisieren, dass sie vom Fahrzeug erkannt wurden und gefahrlos die Straße überqueren können. Auch die Möglichkeit der Kommunikation mit anderen Autofahrern kann eine sinnvolle Ergänzung des Funktionsumfangs darstellen. Für Einfädelsituationen wurde dies bereits von KRAHNSTÖVER [KRAH17] untersucht.



Abbildung 3.2: Beispielhafte Projektion der zulässigen Maximalgeschwindigkeit

KRAHNSTÖVER [KRAH17] kommt zu dem Schluss, dass der Einsatz von Informationsprojektion eine sinnvolle und intuitive Erweiterung bestehender Fahrerassistenzsysteme bietet und arbeitet insbesondere die Vorteile symbolbasierter Kommunikation mit dem Fahrer und anderen Verkehrsteilnehmern heraus. Ein Ergebnis der Arbeit ist unter anderem, dass in den folgenden Fahrmanövern eine zusätzliche Unterstützung des Fahrers besonders sinnvoll ist:

- Folgen einer Straße
- Einfacher Fahrstreifenwechsel
- Einfädelmanöver.

Zur Umsetzung der vorgeschlagenen Assistenzfunktionen werden dazu verschiedene Darstellungsformen untersucht und bewertet. Die Projektion von dynamisch bewegten, pfeilähnlichen Symbolen in verschiedenen Farben stellte sich dabei als besonders sinnvoll heraus. Diese Symbole sind vergleichbar mit den in Abbildung 3.1 eingezeichneten Linien und werden von KRAHNSTÖVER [KRAH17] als *Gräten* bezeichnet, deren Projektion überlagert mit einer statischen Abblendlichtverteilung erfolgte.

Für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Demonstrator wird aus diesem Grund als Ziel gesetzt, die farbige Projektion bewegter Linien wie auch von Symbolen direkt vor dem Fahr-

zeug zu ermöglichen, wie sie in den beiden Abbildungen 3.1 und 3.2 dargestellt sind. Das System bietet damit eine Erweiterung zu bestehenden Scheinwerfern und kann als Zusatz zu einem bestehenden Beleuchtungssystem ein erhebliches Maß an zusätzlicher Verkehrssicherheit bewirken.

Anhand des umgesetzten Systemaufbaus können dann auch weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der dargestellten Symbole auf die Verkehrssicherheit durchgeführt werden. Ebenso lassen sich weitere Zusatzfunktionen wie beispielsweise eine Logoprojektion des Fahrzeugherstellers oder die Darstellung fahrerindividueller Informationen evaluieren.

3.2 Informationsprojektion und lichttechnische Anforderungen

Die lichttechnischen Anforderungen an den aufzubauenden Prototypen ergeben sich aus dem zuvor aufgeführten Ziel, eine farbige Symbolprojektion vor einem Fahrzeug zu ermöglichen, die besonders dem Fahrer hilfreiche Informationen bieten kann. Zusätzlich soll für zukünftige Weiterentwicklungen eine Verringerung des Bauraums bei größtmöglicher Lichtleistung angestrebt werden. Weiterhin soll ein strahlgeführtes System aufgebaut werden, was aus den in Abschnitt 4.1 angeführten Überlegungen eine Laserlichtquelle bedingt.

3.2.1 Darstellungsbereich

Zunächst muss der Bereich definiert werden, in dem ein Bild erzeugt werden soll. Die geometrischen Zusammenhänge dazu sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Als Einbauhöhe des Moduls wird die Scheinwerferhöhe eines SUV (Sport Utility Vehicle) mit $z_{SW} = 0,9\text{ m}$ angenommen. Für die Integration in ein Serienfahrzeug ist bei geeigneter Baugröße des Moduls auch eine Positionierung am Fahrzeugdach sinnvoll. Dadurch gleichen sich Betrachtungswinkel des Fahrers und Projektionswinkel des Moduls an.

Als Projektionsentfernung eignet sich nach LEE [LEE11] der Bereich um 12,6 m gut für die Darstellung von Informationen. Der Zielraum für den Darstellungsbereich des aufgebauten Moduls wird deshalb in einer Entfernung zwischen 5 m und 15 m vor der Fahrzeugfront festgelegt. Die von LEE [LEE11] ermittelte bevorzugte Breite bei 12,6 m Entfernung ist 1,5 m. Für den

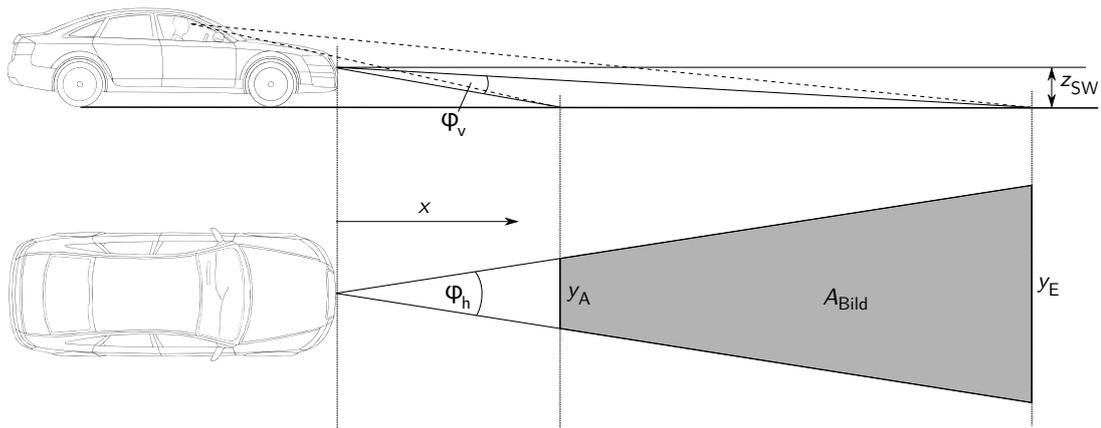


Abbildung 3.3: Darstellungsbereich des Projektionsmoduls

aufzubauenden Demonstrator wird eine Breite von $y_A = 1$ m in 5 m Entfernung festgelegt. Dies führt in einer Entfernung von 10 m vor dem Fahrzeug zu 2 m Projektionsbreite und für das Ende des Bereichs bei $x_E = 15$ m zu einer Breite $y_E = 3$ m. Daraus ergibt sich eine trapezförmige Projektion mit einer Gesamtfläche von $A_{\text{Bild}} = 20 \text{ m}^2$, die für die Informationsdarstellung verwendet werden soll. Abhängig von der Art der zu projizierenden Informationen kann für bestimmte Anwendungsfälle auch ein kleinerer Bildbereich verwendet werden. Aus diesem Grund wird die Möglichkeit, kleinere Bereiche zu erzeugen in der Systemauslegung berücksichtigt.

Die für den maximalen Darstellungsbereich benötigten optischen Öffnungswinkel am Mikrospeigel ergeben sich aus diesen Randbedingungen nach den folgenden Gleichungen:

$$\varphi_h = 2 \cdot \arctan\left(\frac{y_A}{2 \cdot x_A}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{y_E}{2 \cdot x_E}\right) \quad (3.1)$$

$$\varphi_v = \arctan\left(\frac{z_{\text{SW}}}{x_A}\right) - \arctan\left(\frac{z_{\text{SW}}}{x_E}\right). \quad (3.2)$$

Dabei ist x_A der Abstand vom Fahrzeug zum Bildanfang und x_E der zum Ende des Darstellungsbereichs. Für den angestrebten maximalen Darstellungsbereich zwischen 5 und 15 m vor dem Fahrzeug ergibt sich ein horizontaler Öffnungswinkel von $\varphi_h = 11,42^\circ$ und in vertikaler Richtung ein Winkel von $\varphi_v = 6,77^\circ$.

Für die tatsächliche Bewegung des Spiegels ist jeweils nur die Hälfte des optischen Winkels notwendig, da aufgrund des Reflexionsgesetzes immer eine Verdopplung des optischen Öffnungswinkels erfolgt.

Beim Bildaufbau wird für den vorliegenden Fall von einem einzigen Projektor ausgegangen. Sollte das Bild mit zwei oder mehr Projektoren erzeugt werden, so ist eine aufwendige Kali-

brierung des Systems notwendig. Für die Überlagerung der Bilder aus mehreren Projektoren ist entweder genaue Kenntnis der Projektionsfläche erforderlich, oder es muss eine Regelschleife mit Bilderfassung implementiert werden. Andernfalls führen Fahrbahnebenenheiten oder auch Steigungen zu versetzten Bildern auf der Straße.

3.2.2 Beleuchtungsstärke und Lichtstrom

Für die Darstellung von Informationen in den Verkehrsraum ist ein wichtiger Faktor die Erkennbarkeit der Projektionen. Diese ist stark von Umgebungsfaktoren wie auch vom Betrachter abhängig. So nimmt das Auflösungsvermögen und auch die Sehleistung mit zunehmendem Alter des Betrachters stark ab [JÜRIG15]. Entscheidend für die Erkennbarkeit ist außerdem der Intensitätsunterschied der Information verglichen mit der Umgebungshelligkeit. Eine Untersuchung dazu ist von KHANH UND HUHN [KHAN15b] durchgeführt und vorgestellt worden. Weitergehende Untersuchungen insbesondere für beleuchtete Straßensituationen wurden von WALKLING UND SCHIERZ [WALK13] durchgeführt und veröffentlicht. Die dafür notwendige zu betrachtende Größe ist der Kontrast, der auch als *Weber-Kontrast* bezeichnet wird und definiert ist als

$$C = \frac{(L^* - L_U)}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U}. \quad (3.3)$$

mit den folgenden Größen:

L^* als Leuchtdichte des darzustellenden Objekts in cd/m^2 und

L_U als Umgebungsleuchtdichte in cd/m^2 .

Hieraus kann die sogenannte Unterschiedsempfindlichkeit UE bestimmt werden, die als Kehrwert des Kontrasts definiert ist [KHAN15b]:

$$UE = \frac{1}{C} = \frac{L_U}{\Delta L}. \quad (3.4)$$

Nach KHANH UND HUHN [KHAN15b] besteht ein Zusammenhang zwischen der Unterschiedsempfindlichkeit und der mittleren Leuchtdichte der Fahrbahn L_U . Danach wird die Unterschiedsempfindlichkeit größer, je größer die Leuchtdichte auf der Fahrbahn ist.

Unter der Annahme, dass der Straßenbelag das gesamte einfallende Licht nach dem Lambertschen Gesetz diffus reflektiert, kann für den Lichtstrom Φ nach HÖPE UND HAUER [HÖPE10]

der folgende Zusammenhang angenommen werden, bei dem der Straßenbelag als Lichtquelle betrachtet wird:

$$\Phi = I_0 \cdot \pi. \quad (3.5)$$

Weiterhin gilt für Lambertstrahler [MESC10]:

$$I = I_0 \cdot \cos \alpha. \quad (3.6)$$

Für die Lichtstärke des abgestrahlten Lichts ergibt sich somit in Verbindung mit der in Abschnitt 2.1.1 aufgeführten Gleichung 2.4:

$$I = \frac{E \cdot A \cdot \cos \alpha}{\pi}. \quad (3.7)$$

Einsetzen in Gleichung 2.5 führt dann zu

$$L = \frac{E \cdot A \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot A \cdot \cos \alpha} = \frac{E}{\pi}. \quad (3.8)$$

Die vorangegangenen Gleichungen verwenden dabei die folgenden Größen:

Φ : Lichtstrom in lm

I : Intensität des abgestrahlten Lichts in cd

I_0 : Intensität des einfallenden Lichts in cd

α : Abstrahl-/ Betrachtungswinkel

E : Lichtstromdichte der Straßenoberfläche in lx

A : Fläche in m²

L : Leuchtdichte in cd/m².

Somit kann ein Zusammenhang zwischen der für den Betrachter relevanten Leuchtdichte und der Beleuchtungsstärke auf der Straße hergestellt werden. Die vorherigen Gleichungen gehen jedoch von einer ideal reflektierenden Straßenoberfläche aus, was nicht der Realität entspricht. Vielmehr kann nach BAEHR UND STEPHAN [BAEH13] für die asphaltierte Straße ein mittlerer Reflexionsgrad von $\varrho = 0,07$ angenommen werden. Für die Umgebungsbeleuchtungsstärke der Straße E_U gilt dann:

$$E_U = E_{\text{Scheinwerfer}} \cdot \varrho. \quad (3.9)$$

Insgesamt folgt für E_U also der folgende Zusammenhang mit der Leuchtdichte:

$$E_U = \frac{L_U \cdot \pi}{\rho}. \quad (3.10)$$

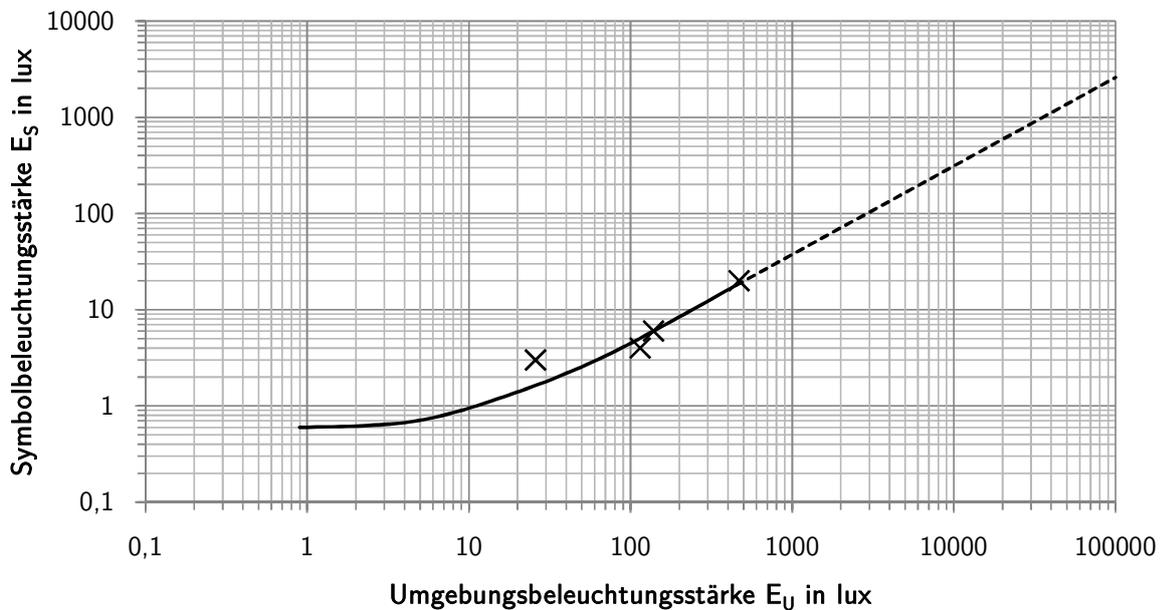


Abbildung 3.4: Zusammenhang zwischen Umgebungsbeleuchtungsstärke und minimal erforderlicher Beleuchtungsstärke für die Sichtbarkeit einer Symbolprojektion

Mit Hilfe von Gleichung 3.10 können aus den Ergebnisse von KHANH UND HUHNS [KHAN15b] Beleuchtungsstärken auf der Straße bestimmt werden, die messtechnisch gut zu erfassen sind und auch eine einfache Vergleichbarkeit mit anderen Systemen bieten. Für die Einordnung und Auslegung kann nun der in Abbildung 3.4 dargestellte Zusammenhang zwischen Umgebungsbeleuchtung und notwendiger Beleuchtungsstärke der dargestellten Information (E_S) verwendet werden. Die schwarz durchgezogene Linie basiert direkt auf den von KHANH UND HUHNS [KHAN15b] angegebenen Werten, die daran anschließende gestrichelte Linie ist eine Extrapolation der Kurve.

Um eine Abschätzung über die Anwendbarkeit der Annahmen treffen zu können, wird eine Probe mit drei Versuchspersonen durchgeführt. Dazu wird mit einem Projektor ein Bild auf einen dunklen Untergrund projiziert. Dieses Bild besteht aus einem darzustellenden Symbol und einem weißen Hintergrund. Die Intensität des Symbols wird stufenweise erhöht, bis die Versuchsperson es erkennen kann. Daraufhin werden dann Beleuchtungsstärke der Umgebung (Bild ohne Symbol) und die Beleuchtungsstärke mit dem dargestellten Symbol aufgenommen.

Die daraus resultierende Differenz ergibt die notwendige Beleuchtung um die Sichtbarkeit des Symbols zu gewährleisten. Anschließend wird die Helligkeit des dargestellten Bildes reduziert und der Versuch erneut durchgeführt. Die dabei ermittelten Sichtbarkeitsgrenzen liegen auf der berechneten Kurve oder mit einer Abweichung von weniger als 2 lx davon entfernt. Anhand der Übereinstimmung kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelte Kurve für überschlägige Betrachtungen benötigter Intensitäten angewendet werden kann.

Aufgabe des Projektionsmoduls ist die Darstellung von Informationen im Verkehrsraum, die somit mindestens mit dem Licht einer Abblendlichtverteilung überlagert werden, da dieses bei schlechten Sichtverhältnissen angeschaltet ist. Im Fall der Dämmerungsfahrt ist die Umgebung gegebenenfalls sogar noch heller.

Aus den zuvor ermittelten Werten für die Sichtbarkeit von projizierten Darstellungen ergeben sich je nach Einsatzumgebung unterschiedliche benötigte Beleuchtungsstärken, die im Folgenden vorgestellt und in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind. Soll eine Sichtbarkeit auch tagsüber gewährleistet sein, beispielsweise an einem zwar bedeckten, aber doch hellen Tag, so muss die Sichtbarkeit bei einer Umgebungsbeleuchtungsstärke von 19.000 lx ermöglicht werden. Scheint gar die Sonne, so ist im Sommer im Mittel mit 90.000 lx zu rechnen [DIN5034]. Im Fall der Dämmerung bei untergehender Sonne liegt die Beleuchtungsstärke der Umgebung bei unter 750 lx und fällt auf geringe einstellige Werten. Bei Dunkelheit ist mit bis zu 0,3 lx im Mondlicht zu rechnen. Für den Fall der künstlichen Beleuchtung liegt durch Straßenlaternen eine Beleuchtungsstärke von etwa 10 lx vor und durch Scheinwerferlicht werden im betrachteten Darstellungsbereich auf der Straße bis zu 15 lx für das eingeschaltete Fernlicht erreicht. [SEID92]

Für eine Sichtbarkeit der Symbole ist nach der zuvor ermittelten Kurve für die Sichtbarkeit eine minimale Beleuchtungsstärke von ca. 2000 lx bei direktem Sonnenschein und ca. 600 lx bei bedecktem Himmel notwendig. Für die einsetzende Dämmerung verringert sich dieser Wert auf 30 lx und fällt bei fortschreitender Dämmerung bis hin zu 0,6 lx bei Mondschein. [SEID92]

Um das System in möglichst vielen Umgebungsbedingungen einsetzen zu können, aber dennoch einen vertretbaren Aufwand hinsichtlich des Modulaufbaus zu erhalten, wird der Einsatz der Informationsprojektion für eine Fahrt bei Sonnenuntergang mit eingeschalteten Scheinwerfern und Straßenbeleuchtung ausgelegt.

Die zuvor durchgeführten Berechnungen basieren auf der Annahme einer hell/dunkel-Projektion und berücksichtigen deshalb für die Erkennbarkeit lediglich den Helligkeitsunterschied zur Umgebung. Nach WÖRDENWEBER ET AL. [WÖRD07] ist für die Projektion farbiger Informationen sowie dynamischer Bilder eine deutlich geringere Schwelle für die Erkennung eines Objekts erforderlich, so dass ein System mit den hier aufgeführten Auslegungswerten in jedem Fall sichtbare Informationen erzeugt.

Tabelle 3.1: Erforderlicher Projektions-Lichtstrom für unterschiedliche Bildgrößen und Umgebungsbeleuchtung

Situation	Beleuchtungsstärke der Umgebung in lx	Erforderliche		Lichtstrom Projektion in lm
		Beleuchtungsstärke Projektion in lx	Bildgröße in m ²	
Mittagssonne Sommer	90.000	2.000	20	40.000
			10	20.000
			5	10.000
			1	2.000
Bedeckter Himmel	19.000	600	20	12.000
			10	6.000
			5	3.000
			1	600
Beginn Dämmerung	750	30	20	600
			10	300
			5	150
			1	30
Scheinwerferlicht	15	1,2	20	24
			10	12
			5	6
			1	1,2
Straßen- beleuchtung	9,5	1	20	20
			10	10
			5	5
			1	1
Mondlicht	0,3	0,6	20	12
			10	6
			5	3
			1	0,6

Da die Beleuchtungsstärke des scannend erzeugten Bildes von der Größe der Bildfläche abhängt, während der Lichtstrom für jede Farbeinstellung konstant bleibt, wird aus den Beleuchtungsstärken für verschiedene Bildgrößen der erforderliche Lichtstrom berechnet und ebenfalls

in Tabelle 3.1 eingetragen. Dazu kann Gleichung 2.3 unter der Annahme eines verlustfreien optischen Systems verwendet werden. Für eine Beleuchtung des gesamten Fläche des Darstellungsbereichs aus Abschnitt 3.2.1 von $A_{\text{Bild}} = 20 \text{ m}^2$ mit durchschnittlich 30 lx ergibt sich so ein notwendiger Lichtstrom von

$$\Phi_{\text{V,Scanner}} = 30 \text{ lx} \cdot 20 \text{ m}^2 = 600 \text{ lm.} \quad (3.11)$$

Bei einer Verringerung der Größe des dargestellten Symbols reduziert sich der benötigte Lichtstrom entsprechend. Für einige ausgewählte Fälle ist dies in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Sind sowohl Straßenbeleuchtung als auch Fahrzeugscheinwerfer eingeschaltet, kann von einer Beleuchtungsstärke auf der Straße von etwa 25 lx ausgegangen werden. Dies führt gemäß Abbildung 3.4 zu etwa $1,6 \text{ lx}$ erforderlicher Scanner-Beleuchtungsstärke und damit zu einem Lichtstrom des Scanners von 32 lm für die gesamte Fläche von 20 m^2 .

Wie zuvor erwähnt, führen dynamische sowie farbige Darstellungen zu einer Verbesserung dieses Werts und zu einer Sichtbarkeit bei helleren Umgebungsbedingungen. Ebenfalls kann zur Erhöhung der Erkennbarkeit der Projektionsbereich dynamisch an die Lichtverhältnisse angepasst werden, so dass auch schon im Verlauf der Dämmerung eine sinnvolle Projektion mit den angestrebten 32 lm möglich ist.

3.2.3 Farbraum

Für Systeme der Fahrzeugfrontbeleuchtung gelten grundsätzlich die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen gesetzlichen Randbedingungen. Damit ist die emittierte Lichtfarbe für einen Scheinwerfer im Bereich des sogenannten ECE-weiß festgelegt [ECE48]. Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte System dient jedoch hauptsächlich der Fahrerassistenz und soll damit über einen größeren Funktionsumfang verfügen. Mindestens sollen Symbole in den im Verkehrsraum üblichen Farben rot, gelb und grün dargestellt werden. Um eine große Flexibilität in der Farbwahl zu behalten, werden auch Mischfarben angestrebt.

In Abschnitt 2.1.2 ist die Bestimmung der Farbe als Summe der drei Farbwerte X, Y und Z zur Bestimmung der Koordinaten x und y auf der Normfarbtafel vorgestellt. Werden mehrere Ursprungsfarben verwendet und gemischt, so kann durch Variation der Intensitäten ein Farbraum aufgespannt werden. Übliche Grundfarben insbesondere für Anzeigegeräte sind die Farben rot, grün und blau (RGB) [SCHM13]. Der darstellbare Farbraum ergibt sich dann aus drei Koordi-

naten in der Normfarbtafel (rot, grün und blau), die die Eckpunkte eines Dreiecks bilden. Alle Farborte innerhalb des Dreiecks lassen sich durch eine Intensitätsvariation der Ausgangsfarben erreichen.

Ein in der Bildwiedergabe üblicher Farbraum ist der sogenannte *sRGB*-Raum. Er wurde 1996 durch die International Electrotechnical Commission (IEC) festgelegt und für Europa in Form der DIN EN 61966-2-1 übernommen [DIN61966]. Er ist der Standardfarbraum in vielen Bildformaten und daher als Minimalanforderung für farbige Projektion gut geeignet. Die Eckpunkte des aufgespannten Farbdreiecks sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: *sRGB*-Farbraum nach DIN EN 61966-2-1 [DIN61966]

	Farbkoordinaten	
	x	y
Rot	0,64	0,33
Grün	0,30	0,60
Blau	0,15	0,06

3.2.4 Bildwiederholfrequenz und Auflösung

Ein dynamisches Bild besteht aus vielen, einzeln ansteuerbaren Bildpunkten. Ein entscheidendes Kriterium für die Charakterisierung der Bilderzeugung ist die Anzahl der Bildpunkte, Pixel genannt. Ein weiteres relevantes Merkmal ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Anzeige ändern lässt, die Bildwiederholfrequenz. Hochauflösende, dynamische Bilder sind bisher hauptsächlich aus der Unterhaltungsindustrie bekannt. Erste Anwendungen in Scheinwerfern und zukünftige Einsatzmöglichkeiten für derartige Systeme sind in den Abschnitten 2.3.2 und 3.1 beschrieben.

Die Bildwiederholfrequenz spielt an dieser Stelle eine wichtige Rolle. Um dem Auge den Eindruck einer flüssigen Bewegung zu vermitteln reichen nach SCHMIDT [SCHM13] bereits ca. 20 Bilder pro Sekunde aus. Je nach Umgebungshelligkeit erscheinen Frequenzen in diesem Bereich manchmal trotzdem als flackernd. Aus diesem Grund wird in der Unterhaltungsindustrie beispielsweise bei Fernsehern und Projektoren eine höhere Bildwiederholfrequenz eingesetzt. Der Grund für diesen Effekt liegt im periodischen Schalten des Bildes, das eine Schwankung der Bildleuchtdichte zur Folge hat. Dies kann dazu führen, dass der Betrach-

ter ein Flimmern des Bildes wahrnimmt. Entscheidend für die Wahrnehmung dieses Flimmerns ist nach MAHLER [MAHL05] die Leuchtdichteamplitude ΔL zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern. Der Zusammenhang zwischen Leuchtdichteamplitude und Bildfrequenz ist in Abbildung 3.5 dargestellt, wobei die gepunktete Linie eine Extrapolation der von MAHLER [MAHL05] angeführten Werte darstellt. Abhängig von der verwendeten Bildfrequenz kann so die maximal darstellbare Leuchtdichteamplitude bestimmt werden, die ohne den Eindruck des Flimmerns darstellbar ist.

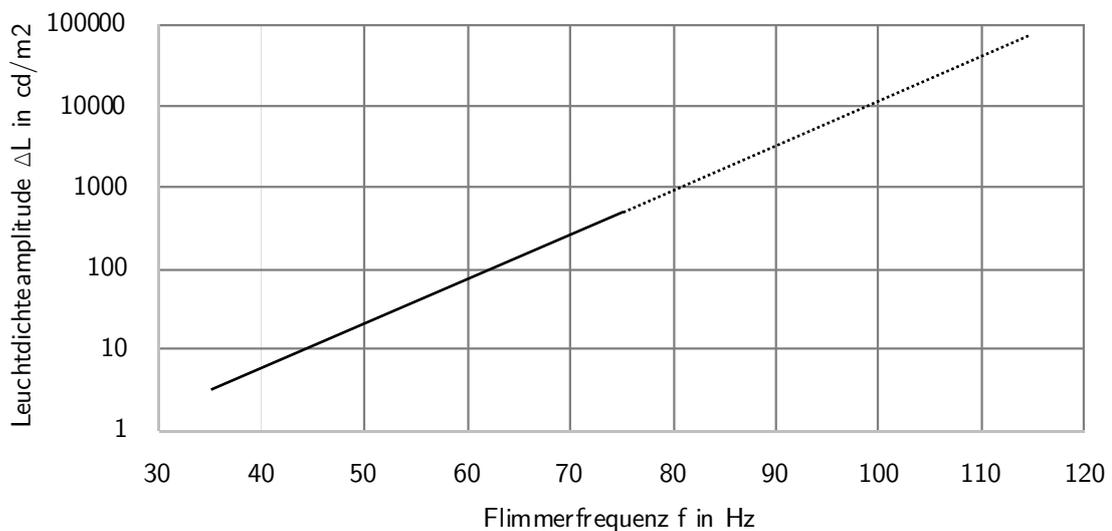


Abbildung 3.5: Abhängigkeit der Leuchtdichteamplitude von der Flimmerfrequenz nach MAHLER [MAHL05]

Beim Einsatz im Fahrzeugscheinwerfer kann von einer strukturierten Oberfläche ausgegangen werden, die zur Projektion genutzt wird. Dies kann neben dem beleuchteten Straßenbelag auch der Fahrbahnrand mit einer Vielzahl verschiedener Objekte sein. Die Strukturierung der Oberflächen hat Einflüsse auf den Eindruck eines Beobachters und auf die notwendigen Bildfrequenzen. Insbesondere periodische Strukturen wie Zäune können zu unerwünschten Effekten führen und müssen deshalb weitergehend untersucht werden. Eine von POLIN [POLI14] durchgeführte Probandenstudie zu den Flimmereffekten einer PWM-Ansteuerung von LEDs lässt jedoch darauf schließen, dass im Bereich von 100 Hz bis 800 Hz in Fahrsituationen keine merklichen Auswirkungen durch die hochfrequente Bilderzeugung zu erwarten sind. Da höhere Frequenzen einen zusätzlichen Aufwand in der Umsetzung der Ansteuerung bedeuten, wird als Ziel für die darzustellenden Symbole eine Bildwiederholfrequenz von 100 Hz angestrebt.

Zur Bestimmung der Auflösung des Systems muss zunächst die Art der Bilderzeugung betrachtet werden. Die dazu verwendeten Verfahren werden im folgenden Kapitel in Abschnitt 4.1 näher ausgeführt und gegliedert. Sie bestehen zum einen aus Bilderzeugern, die immer ein ganzes Bild als Fläche erzeugen (Flächenmodulation), so dass die Bildwiederholfrequenz nicht von der Schaltfrequenz der Lichtquelle abhängt. Zum anderen bestehen sie aus Systemen, die das Bild über die Variation eines einzigen Lichtstrahls erzeugen (Strahlmodulation), was einen direkten Einfluss der Schaltfrequenz an der Lichtquelle auf Bildwiederholfrequenz und Auflösung zur Folge hat.

Für den Fall eines strahlmodulierten Systems ergibt sich die erreichbare Auflösung als Kombination der Frequenz der Ablenkeinheit mit der Schaltfrequenz der Lichtquelle. Als Zielvorgabe für die Diodenansteuerung wird eine Schaltfrequenz von etwa 1 MHz vorausgesetzt, was mit verfügbaren Diodentreibern umsetzbar ist. Dies ermöglicht dann bei einer angestrebten Bildwiederholfrequenz von 100 Hz die Adressierung von 10.000 einzelnen Bildpunkten.

Für Scheinwerferlichtverteilungen vor einem Fahrzeug wird ein eher breites Bildverhältnis von beispielsweise 5:1 für die Erzeugung eines vollständigen Fernlichts angestrebt [WOLF16b]. Für die Darstellung von Symbolen direkt vor dem Fahrzeug, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wird für den Prototypen ein Aspektverhältnis von 2:1 angestrebt.

Damit ergibt sich die Anzahl der Pixel in horizontaler Richtung (x) und in vertikaler (y) zu

$$x \cdot y = 10.000. \quad (3.12)$$

Aus dem Aspektverhältnis von 2 : 1 ergibt sich somit

$$\frac{x}{y} = 2 \Leftrightarrow x = 2 \cdot y \quad (3.13)$$

und damit eine theoretische Pixelanzahl von $x = 142$ und $y = 71$. Aus Gründen der Informationsverarbeitung ist es sinnvoll, für die Auflösung Zweierpotenzen zu verwenden und deshalb 128×64 Pixel zu wählen.

Für die Anzahl der verfügbaren Bildpunkte bedeutet das damit $128 \cdot 64 = 8.192$ Pixel und das Zeitfenster für die Darstellung eines einzelnen Bildpunkts, das der Treiber umsetzen muss ergibt sich zu

$$t = \frac{1}{128 \cdot 64 \cdot 100 \text{ Hz}} = \frac{1}{8.192 \cdot 100 \text{ s}^{-1}} = 1,22 \mu\text{s}. \quad (3.14)$$

Diese Anzahl von Bildpunkten ist für die Darstellung von Informationen ausreichend. So verwenden Zeichengeneratoren früher Digitalanzeigen 5 x 7 oder auch 8 x 8 Pixel für die Darstellung von Zeichen [NEWM79].

3.3 Konstruktive Anforderungen

Zusätzlich zu den Anforderungen an die Lichttechnik und Bildprojektion ergeben sich aus den Randbedingungen auch konstruktive Anforderungen an das Lichtmodul. Diese spielen eine nachgeordnete Rolle, da es sich bei dem Aufbau um einen Funktionsprototypen handelt, dürfen aber dennoch nicht vernachlässigt werden. Der Aufbau soll transportabel und an einen Versuchsträger montierbar sein. Aus diesem Grund soll ein Bauraum von 400 mm Länge und 250 mm Breite nicht überschritten werden. Aufgrund der Möglichkeit, die Laserstrahlen nahezu in einer Ebene zu führen, kann die Bauhöhe mit maximal 100 mm sehr gering gehalten werden.

Für den Einsatz an einem Versuchsträger muss das Gehäuse einen staubgeschützten Abschluss des Aufbaus ermöglichen, weshalb eine Schutzart IP5X nach DIN EN 60529 [DIN60529] angestrebt wird. Für den Strahlaustritt aus dem System ist dazu ein Fenster vorzusehen. Auf diese Weise ermöglicht der Aufbau einen dynamischen Versuchseinsatz auch während der Fahrt. Das Gehäuse dient weiterhin zum Schutz vor austretender Laserstrahlung, die durch Reflexion und Streuung im System entsteht, aber nicht zum bilderzeugenden Strahl gehört. Für den genutzten Laserstrahl müssen gesonderte Maßnahmen zur Gewährleistung der Lasersicherheit getroffen werden.

Für den Laborbetrieb und die Versuche zur Systemfunktion werden als Randbedingungen Umgebungstemperaturen zwischen 20 °C und 30 °C vorausgesetzt. Der Fahrzeugbetrieb bedingt dann einen Temperaturbereich von –40 °C bis 80 °C. Die Umsetzung der Fahrzeugbedingungen ist im ersten Schritt nicht notwendig, da hauptsächlich Untersuchungen zur Umsetzbarkeit von Funktionen durchgeführt werden.

3.4 Elektrische Anforderungen

Weitere Anforderungen an den Versuchsaufbau ergeben sich aus der elektrischen Ansteuerung des Systems. Hier ist einerseits das gesamte System mit Energie zu versorgen, andererseits auch der Diodenstrom präzise zu regeln.

Aus den Überlegungen in Abschnitt 3.2.4 entsteht die Notwendigkeit, die Dioden mit einer hohen Frequenz zu schalten beziehungsweise zu dimmen. Die notwendige Schaltfrequenz ergibt sich entsprechend den Berechnungen aus Gleichung 3.14.

Zum Einstellen der abgegebenen Diodenleistung eignen sich zwei Verfahren, die in Abschnitt 2.2.1 beschrieben sind. Dies ist zum einen die direkte, analoge Stromvorgabe, die dann in einer entsprechenden Abgabeleistung resultiert und zum anderen die Pulsweitenmodulation (PWM), bei der die gewünschte Leistung einen über der Zeit gemittelten Wert darstellt.

Das Dimmen über einen PWM-Betrieb ist eine häufig benutzte Ansteuerungsart von Dioden, führt bei den hohen Schaltgeschwindigkeiten, die für die Bilderzeugung benötigt werden, allerdings zu noch deutlich schnelleren Schaltzeiten. Da die Auflösung durch die minimale Schaltzeit begrenzt wird, soll sie nicht durch einen PWM-Betrieb zusätzlich reduziert werden. Für die Umsetzung wird also eine analoge Einstellung des Diodenstroms vorgesehen, die am Diodontreiber über eine angelegte Steuerspannung realisiert wird. Die Steuerspannung verhält sich proportional zum Strom, der durch die Diode fließt und so die gewünschte Lichtleistung erzeugt.

In der ersten Umsetzungsstufe wird eine konstante Lichtleistung je Diode eingestellt und dann jede Diode über ein Triggersignal an- oder ausgeschaltet. Auf diese Weise sind die drei Diodenfarben sowie Mischungen aus diesen darstellbar, was insgesamt sieben Farben ergibt. Eine derartige Ansteuerung wird über ein digitales Triggersignal in Form von LVTTTL (Low-Voltage-Transistor-Transistor-Logik) umgesetzt. Dabei bedeuten angelegte Spannungen über 3,3V ein logisches *high* und Werte darunter entsprechend *low*. Derartige Steuerungen sind in der Informationstechnik üblich und vergleichsweise einfach zu implementieren. Die analoge Vorgabe von Signalen erfordert eine zusätzliche Elektronik, die für die Darstellung einfacher Symbole keinen zusätzlichen Nutzen bringt und deshalb erst in einem nachfolgenden Schritt umgesetzt wird.

Zur Überprüfung des Diodenzustands wird der Iststrom an der Diode zurückgeführt und ausgelesen. Diese Information dient damit der Zustandsüberwachung des Systemaufbaus und kann unter anderem für eine Abschaltung im Schadensfall genutzt werden.

Neben den Dioden muss auch eine Zustandsüberwachung der Bilderzeugung vorgesehen werden, da die Nutzung eines Laserstrahls mit hoher Energie große Schäden verursachen kann. Sollte der Bilderzeuger keine Bewegung mehr ausführen, würde die gesamte Laserleistung auf einen Punkt gebracht und führt so zu einer hohen Leistungsdichte. Aus Gründen der Lasersicherheit muss dieser Fall erkannt und vermieden werden.

3.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Aufbauend auf den umzusetzenden Fahrerassistenz- und Kommunikationsfunktionen sind in den vorausgehenden Abschnitten die Anforderungen für eine entsprechende Informationsprojektion hergeleitet. Die Anforderungen ergeben sich in den Bereichen Lichttechnik, Elektrik/ Elektronik, Mechanik, Temperatur, Sicherheit und Fertigung und sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Insbesondere die lichttechnischen und die elektrischen Anforderungen haben großen Einfluss auf die Funktion und die Gestaltung des Systems.

Ziel für den im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Aufbau soll ein möglichst flexibles System für die Umsetzung der zuvor beschriebenen Projektionen sein. Eine Systemanpassung für weitergehende Untersuchungen soll sowohl bei einer Weiterentwicklung einzelner verwendeter Technologien als auch auf Grundlage von weiterführenden Studien möglich sein. Aus diesem Grund ist neben den Zielen hinsichtlich der Projektion auch die Erweiterbarkeit des Versuchsaufbaus zu berücksichtigen.

Den Projektionsbereich definieren die Öffnungswinkel des Systems und aus Bildwiederholfrequenz und Laserschaltfrequenz ergibt sich die darstellbare Auflösung. Mit dem System sollen mindestens die drei Farben Rot, Grün und Blau sowie ein daraus gemischtes Weiß darstellbar sein. Angestrebt wird ein Farbraum, der sRGB entspricht oder darüber hinausgeht.

Die elektrischen Anforderungen resultieren zu einem großen Teil aus den Anforderungen der Lichttechnik. Für eine Farbeinstellung muss die abgegebene Leistung der Dioden geregelt werden und für eine korrekte Ansteuerung und Bilderzeugung ist eine Rückführung des Diodenstroms und eine Zustandsüberwachung der Bilderzeugung erforderlich.

Weiterhin muss für ein laserbasiertes System auch die Fragestellung der Lasersicherheit berücksichtigt werden. Das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute System dient hauptsächlich der Evaluierung von Funktionen, wird aber mit dem Ziel aufgebaut, diese auch in einem Serienfahrzeug umzusetzen. Hierfür soll eine aktive Abschaltung auf Grundlage der Zustandsüberwachung der Bilderzeugung erfolgen sowie eine passive Abschirmung von Streulicht vorgesehen werden.

Die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Laserspeckles sind ein typisches Phänomen des kohärenten Laserlichts. Für die Darstellung von Informationen oder auch in der Beleuchtungstechnik sollten sie jedoch vermieden werden. Aufgrund ihrer Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit der Projektionsfläche und der dadurch resultierenden Weglängenunterschiede der Laserstrahlen sind beim Einsatz auf einer Straße und bei Bewegung wenig Effekte durch Speckles zu erwarten, der subjektive Speckleindruck soll aber am aufgebauten Projektionssystem evaluiert werden.

Tabelle 3.3: Anforderungsliste für den Demonstrator

		F = Festforderung Z = Zielforderung W = Wunschforderung		RGB-Laserscanner	
Nr.	Anforderungen	Art	Wert/ Bereich	Toleranz	Var./ Einheit
1 Lichttechnik					
1.1	Projektionsdistanz	F	5 - 15	-	x / m
1.2	Öffnungswinkel horizontal	F	11,42	-	$\varphi_h / ^\circ$
1.3	Öffnungswinkel vertikal	F	6,77	-	$\varphi_v / ^\circ$
1.4	Farbraum	W	sRGB	min.	-
1.5	Fläche Laserspot in 10 m	Z	50 x 50	± 10	$A_{Spot} / \text{mm} \times \text{mm}$
1.6	Bildwiederholfrequenz	Z	100	min	f_{Bild} / Hz
1.6	Bildpunkte horizontal	Z	128	min	n_h / Pixel
1.7	Bildpunkte vertikal	Z	64	min	n_v / Pixel
1.8	Lichtstrom	Z	32	min	Φ_v / lm
1.9	Speckles	F	nicht wahrnehmbar	-	-
2. Elektrische Anforderungen					
2.1	Energieversorgung	F	extern	-	-
2.2	Spannungsversorgung Steuerelektronik	F	5	$\pm 0,2$	$U_{Ansteuerung} / \text{V}$
2.3	Spannungsversorgung Diodentreiber	F	12	± 3	$U_{Treiber} / \text{V}$
2.4	Regelung Diodenstrom	F	ja	-	-
2.5	Triggersignal der Dioden	F	3,3 (LVTTTL)	-	U_{Trigg} / V
2.6	Schaltfrequenz Dioden	F	1	min.	f_{LD} / MHz
2.7	Steuersignal Spiegel	F	extern	-	-
2.8	Steuersignal Dioden	F	extern	-	-
2.9	Ausgabe Iststrom Dioden	W	ja	-	-
2.10	Zustandsüberwachung Bilderzeugung	F	ja	-	-
3. Mechanische Anforderungen					
3.1	Bauraum	F	400 x 250 x 100	max.	$L \times B \times H / \text{mm}^3$
3.2	Staubschutz Gehäuse	F	IP5X	-	-
4. Thermische Anforderungen					
4.1	Umgebungstemperatur Laborbetrieb	F	+20 bis +30	min.	$T / ^\circ\text{C}$
4.2	Umgebungstemperatur Fahrzeugeinsatz	W	-40 bis +80	min.	$T / ^\circ\text{C}$
5. Sicherheit					
5.1	Austritt kollimierter Laserstrahlung im Schadensfall verhindern	F	aktiv und passiv	-	-
5.2	Lasersicherheit Umgebung	F	Betrieb oberhalb Grenz- geschwindigkeit	-	-
6. Fertigung und Material					
6.1	Gehäusefertigung	Z	im Haus	-	-
6.2	Gehäusematerial	F	Aluminium	-	-

4 Konzepte zur hochauflösenden Bilderzeugung

Für die in Abschnitt 2.3 aufgeführten hochauflösenden Scheinwerfersysteme und auch für Head-Up-Displays ist die Umsetzung der Bilderzeugung Kernelement der Systeme. Für die Entwicklung eines Projektionssystems zur Darstellung von Informationen, wie es im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll, ist eine Gegenüberstellung der verfügbaren technologischen Konzepte deshalb ein wichtiger Schritt. Dazu wurden in Kapitel 3 die umzusetzenden Funktionen und weitere Anforderungen an das System aufgestellt.

Um die Projektion von farbigen Symbolen vor dem Fahrzeug zu ermöglichen, erfolgt die Umsetzung mit einem scannenden Mikrospiegel und RGB-Laserdioden. Die Technologien und Konzepte zur Erzeugung hochaufgelöster Bilder werden dazu im Folgenden vorgestellt und mit dem Mikrospiegel Aufbau verglichen.

Die Ergebnisse werden schließlich in Form eines Konstruktionskatalogs aufgestellt. Auf diese Weise können die Technologien hinsichtlich ihrer für das System relevanten Eigenschaften verglichen werden.

4.1 Elemente zur Bilderzeugung

Kernelement für die dynamische Projektion von Informationen ist eine Bilderzeugungseinheit, die das Licht der Lichtquelle derart beeinflusst, dass das gewünschte Bild entsteht. Grundsätzlich lässt sich für die Bilderzeugung dabei zwischen Flächen- und Strahlmodulation unterscheiden, wie in Abbildung 4.1 dargestellt.

Bei der Flächenmodulation wird eine pixelbasierte Bilderzeugungseinheit über ein optisches System auf die Projektionsfläche abgebildet. Es lässt sich also das Bild als Ganzes erzeugen

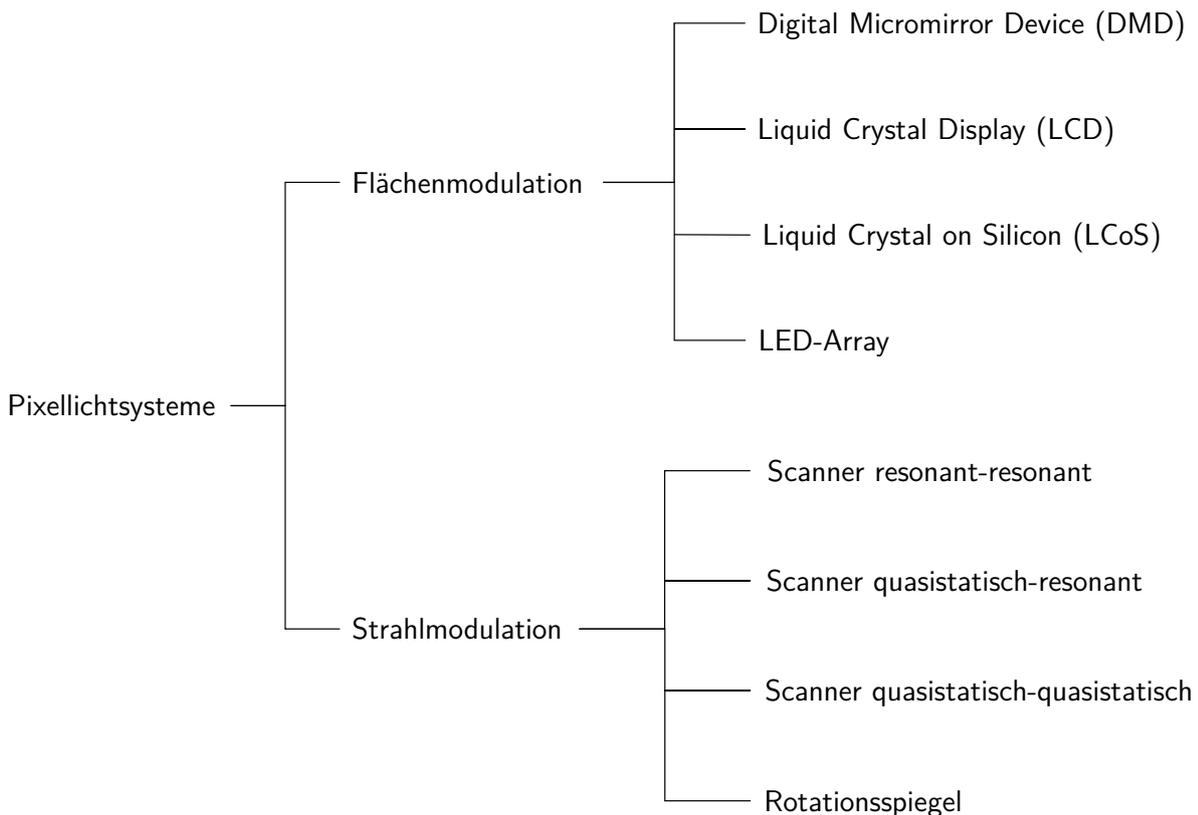


Abbildung 4.1: Technologieüberblick zur Bilderzeugung angelehnt an [KLOP16a]

und beeinflussen. Die Bildwiederholfrequenz entspricht der Frequenz, mit der die Bilderzeugungseinheit geschaltet werden kann.

Im Fall der Strahlmodulation wird ein einzelner Lichtstrahl bzw. ein Strahlenbündel durch eine Ablenkeinheit verändert. Im Gegensatz zur Flächenmodulation wird so nicht ein Bild als Ganzes aufgebaut sondern Punkt für Punkt. Der Strahl wird von einem Bildpunkt zum nächsten bewegt und kann dabei immer für die jeweils aktuelle Position in Farbe und Intensität angepasst werden. Bei diesem Verfahren ist die limitierende Größe für die Geschwindigkeit des Bildaufbaus neben der Ablenkgeschwindigkeit auch die Frequenz, mit der der Lichtstrahl geschaltet werden kann. Die Anzahl der darstellbaren Bildpunkte steht somit in direktem Zusammenhang mit der Ansteuerungsfrequenz.

4.1.1 DMD

Eine Umsetzungsvariante für die flächenbasierte Lichtmodulation ist die Bilderzeugung mittels DMD. Die Abkürzung DMD steht für *Digital Micromirror Device* und ist ein Teil der von der

Firma Texas Instruments entwickelten *Digital Light Processing*-Technologie (DLP) [SCHM13], [BHA15].

Es handelt sich bei einem DMD um ein Array sehr kleiner Mikrospiegel, die in verschiedenen Ausführungsformen existieren. Die am häufigsten eingesetzten sind mit Aluminium beschichtet und haben jeweils eine Fläche von ca. $13 \mu\text{m}^2$. Zu jedem Punkt des resultierenden Bildes gehört ein eigener Spiegel, der durch elektrostatische Anziehung um typischerweise $\pm 12^\circ$ verkippt werden kann [SCHM13]. Die Spiegel lenken das auf sie fallende Licht entweder in eine Projektionsoptik oder auf einen Absorber. Dies ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt. Um

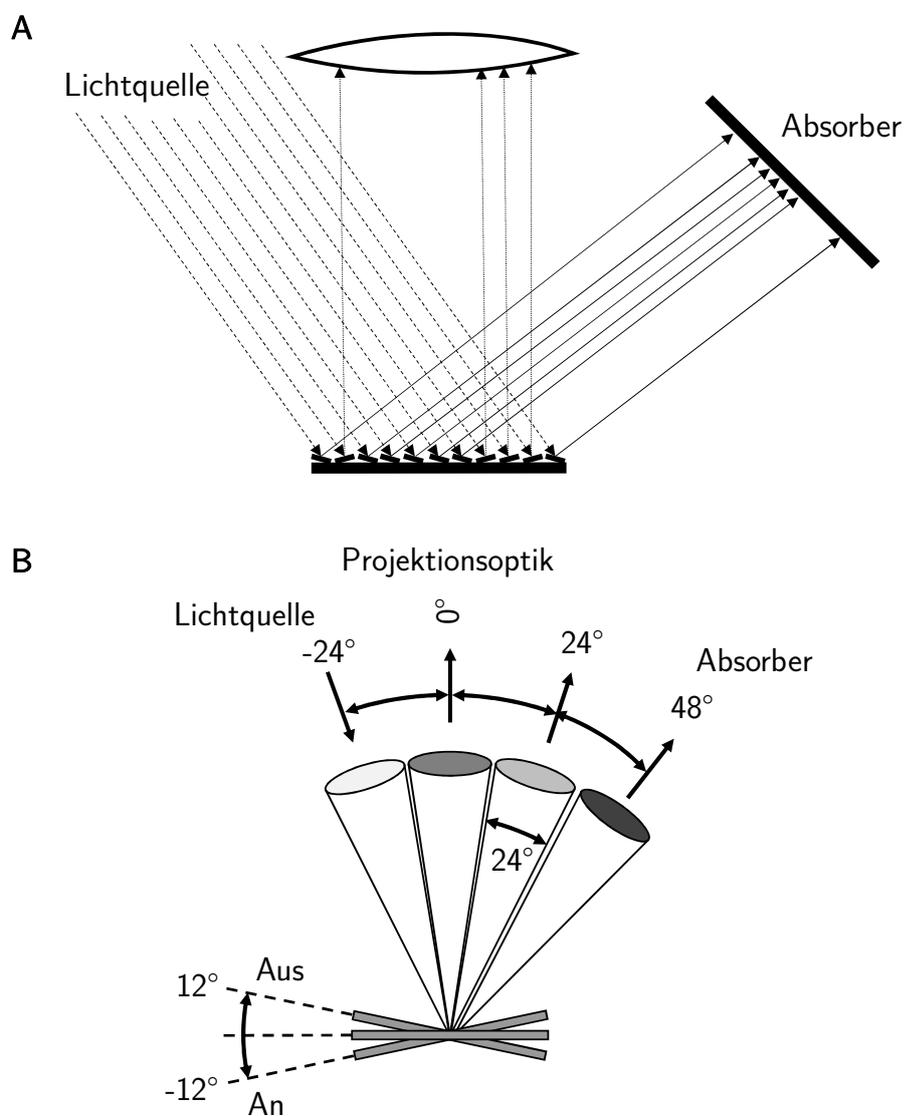


Abbildung 4.2: Aufbau von DMD-Bilderzeugung:

A: Funktionsweise der Bilderzeugung mit einem DMD

B: Spiegelstellungen und Winkel in DMD-Systemen

diese Technologie für die Darstellung verschiedener Helligkeiten zu verwenden, wird die Lichtmenge über eine Variation des Schaltrhythmus durch Pulsweitenmodulation (PWM) angepasst [DOHE98].

Gegenwärtig verfügbare DMD-Module verwenden ein Bildverhältnis von 16:9 bzw. 16:10, wie es in der Unterhaltungsindustrie üblich ist. Für die breite, aber vertikal flache Lichtverteilung, die in der Fahrzeuglichttechnik verwendet wird, muss eine zusätzliche Optik eingesetzt werden. BHAKTA UND BALLARD [BHAK15] verwenden dazu eine anamorphotische Projektionsoptik, von WOLF ET AL. [WOLF16b] wird eine rotationssymmetrische Optik vorgestellt. Diese Optik verzerrt das Bild derart, dass der Lichtstrom einer homogen leuchtenden Fläche in der Bildmitte konzentriert wird und damit eine hohe Intensität erreicht werden kann. Durch diese Umverteilung können die typischen Intensitäten einer Scheinwerferlichtverteilung erreicht werden, ohne eine lokale thermische Überlastung des Spiegelarrays zu riskieren.

Der zuvor beschriebene DMD-Aufbau bestehend aus aluminiumbeschichteten Mikrospiegeln lässt für handelsübliche Systeme derzeit einen Wirkungsgrad von etwa 66 % zu [BHAK15]. Aufgrund der im Betrieb entstehenden Verluste erfolgt bei hoher Beleuchtung auch ein großer Wärmeeintrag in das System. Um ein Überhitzen der Mikrospiegel und eine permanente Beschädigung des DMD zu verhindern, werden die Spiegel deshalb in gewissen Betriebszuständen durch die Ansteuerung zusätzlich bewegt, was dazu führt, dass die maximalen Intensitäten nicht mehr erreicht werden können und auch die angestrebten Intensitätsminima nicht mehr erzielt werden [WOLF16b].

Beim Einsatz von DMD-Elementen besteht eine Möglichkeit zur Steigerung der Systemeffizienz in der teilweisen Beleuchtung des Spiegelarrays. Während nur die tatsächlich für die Lichtverteilung genutzten Bereiche beleuchtet werden, kann die Lichtquelle für ungenutzte Bereiche ausgeschaltet bleiben um Energie zu sparen. Um dies umzusetzen muss eine geeignete Lichtquelle zur Verfügung stehen, was aufgrund der geringen DMD-Fläche eine Herausforderung darstellt. Aus diesem Grund wird die Lichtquelle eines DMD-Scheinwerfers in den bisher umgesetzten Formen immer komplett angeschaltet und das nicht benötigte Licht wird auf den Absorber gelenkt.

Verglichen mit einer strahlmodulierten Bilderzeugung, deren Konzepte in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden, verfügt ein DMD-Aufbau über eine festgelegte Projektionsfläche, die zum Zeitpunkt der Systemauslegung definiert wird. Eine dynamische Anpassung der

Position und Größe des projizierten Bildes ist ohne Verluste oder mechanische Zusatzelemente nicht möglich.

Gegenwärtig verfügbare DMD-Chips verfügen über einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad von etwa 66 %, was durch eine optimierte Beschichtung der Spiegel verbessert werden könnte. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Anbietern mit DMD-Lösungen ist in naher Zukunft allerdings nicht mit einer Anpassung der Beschichtung zu rechnen.

Der Einsatz eines DMD zur Bilderzeugung erfordert außerdem ein zusätzliches, abbildendes optisches System, das je nach Lichtquelle gegebenenfalls auch einer Farbkorrektur bedarf. Strahlmodulierte Scannersysteme hingegen können ohne derartige Optiken ausgelegt werden.

Für die Erzeugung farbiger Bilder mit einem DMD-Aufbau kann entweder für jede Farbe ein eigenes DMD-Array verwendet werden, oder die Farben werden nacheinander auf ein Spiegellarray gebracht und die einzelnen Bilder dann so schnell erzeugt, dass das menschliche Auge die Summe wahrnimmt. Letzteres Verfahren wird beispielsweise in DLP-Projektoren eingesetzt.

Der theoretisch erreichbare Kontrast beim Einsatz von DMD-Elementen ist sehr hoch, da das auf den Absorber gelenkte Licht vollständig aus der Lichtverteilung genommen wird. Im realen Betrieb müssen die Mikrospiegelelemente jedoch – wie zuvor angeführt – bewegt werden, um ein Überhitzen zu vermeiden. Dieses Verhalten führt zu einer Verringerung des Kontrasts.

4.1.2 LCD

Liquid Crystal Displays (LCD), oder auch Flüssigkristallbildschirme, werden bereits in vielen Gebieten der Informationstechnologie eingesetzt. Hierzu zählen Computer-, Fernseh- und Mobiltelefondisplays. Wie auch DMDs wirken LCDs als passive Elemente, sie strahlen nicht direkt Licht ab sondern beeinflussen es. Ein LCD besteht aus einer Vielzahl einzeln schaltbarer Elemente, die entweder einen lichtdurchlässigen oder einen absorbierenden Zustand annehmen können. Dabei wird der Effekt genutzt, dass polarisiertes Licht durch das Einbringen eines optischen Elements abhängig von seiner Polarisationsrichtung gezielt herausgefiltert oder transmittiert werden kann. Um dies zu erreichen wird zunächst über einen sogenannten Polarisator Licht einer einzigen Polarisationsrichtung erzeugt. Danach wird das polarisierte Licht auf die Flüssigkristallmatrix gelenkt, die das Licht je nach Spannungszustand in seiner Polarisationsrichtung neu orientieren oder unverändert lassen kann. Im Anschluss ist eine weitere Polarisationsfolie

aufgebracht, Analysator genannt. Diese ist je nach Umsetzung entweder nur für das Licht mit gedrehter oder mit unveränderter Polarisationsrichtung durchlässig. [SCHM13], [HESS15a]

Auf diese Weise kann für jedes Flüssigkristallelement definiert werden, ob Licht transmittiert oder im Analysator absorbiert wird. Für den Fall, dass eine bereits polarisierte Lichtquelle, wie beispielsweise ein Laser, verwendet wird, kann auf den Polarisator vor der Flüssigkristallschicht verzichtet und so eine höhere Systemeffizienz erreicht werden. Für den Fall unpolarisierter Lichtquellen haben aktuell verfügbare LCD-Module einen Transmissionsgrad zwischen 50 % und 76 %. Hinsichtlich der Absorption beschreibt HESSE [HESS15a] ein für das BMBF-Projekt VoLiFa 2020 entwickeltes System, das eine Absorption von 99,97 % des Ausgangslichtstroms ermöglicht, handelsübliche Systeme liegen zurzeit jedoch deutlich darunter.

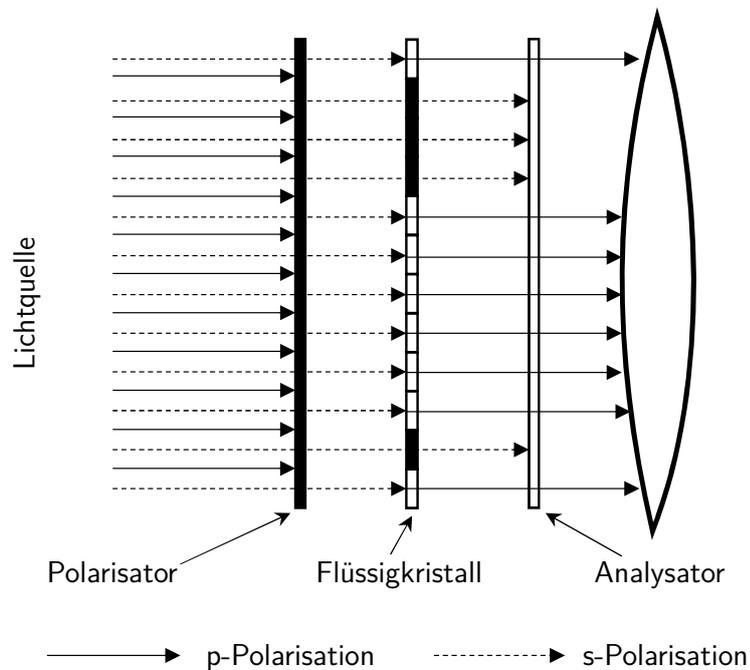


Abbildung 4.3: Funktionsweise einer Bilderzeugung mit LCD

Beim Aufbau eines LCD-Scheinwerfersystems kann als Vorteil genutzt werden, dass LCDs in größeren Abmaßen verfügbar sind als DMDs und darüber hinaus auch im Hinblick auf Pixelgröße und Seitenverhältnis flexibler gestaltet werden können. Weiterhin kann der optische Pfad gegenüber dem DMD-Aufbau kürzer gehalten werden, da kein Weg für das reflektierte Licht freigehalten werden muss. Aufgrund der Baugröße der Modulationseinheit ist es außerdem möglich, einzelne LEDs eines Lichtquellen-Arrays bestimmten Segmenten in der Ziellichtverteilung zuzuordnen. So kann das System effizienter gestaltet werden, da nicht immer alle LEDs angeschaltet sein müssen.

Bei der Verwendung hoher Intensitäten müssen wie auch beim DMD thermische Herausforderungen gelöst werden. Beim LCD kommt dabei noch hinzu, dass die Verdunkelung durch Absorption im Modulationselement erfolgt und so große Wärmemengen abgeführt werden müssen. Ebenfalls ist die Erzeugung von dunklen Bildpunkten, die einen Maximalwert an Intensität nicht überschreiten, eine Herausforderung.

Da LCD-Systeme ebenso wie DMDs zur Kategorie der flächenbasierten Lichterzeugung zählen, gelten für den Vergleich mit scannenden Systemen ähnliche Vor- und Nachteile. Auch hier liegt eine auslegungsseitig festgelegte Projektionsfläche vor, die im Betrieb des Moduls nicht dynamisch angepasst werden kann. Die Verluste entstehen bei der LCD-Bilderzeugung zu einem großen Teil in den Polarisationselementen, was bei der Verwendung von polarisiertem Laserlicht Vorteile gegenüber DMDs bietet. Im Vergleich mit einem scannenden Aufbau hingegen ist der optische Wirkungsgrad des Bilderzeugers dennoch geringer.

Um mit einem LCD-Aufbau Farbbilder zu erzeugen, kann er ähnlich wie beim DMD entweder in mehrere LCD-Elemente aufgeteilt werden oder die Farbinformationen werden zeitlich versetzt erzeugt.

Durch den transmissiven Aufbau und die Funktionsweise von LCD-Systemen ist die vollständige Verdunkelung einzelner Bildpunkte nur näherungsweise erreichbar und somit ist auch der Kontrast für das erzeugte Bild geringer als bei einem scannenden System. Ebenso wie beim DMD ist bei der Verwendung eines LCD ein zusätzliches abbildendes optisches System für die Projektion erforderlich.

4.1.3 LCoS

Die Abkürzung LCoS steht für *Liquid Crystal on Silicon* und beschreibt eine Technologie, bei der ein LCD-Element nicht transmissiv eingesetzt ist, wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, sondern in einem reflektiven Aufbau verwendet wird. Vorteil eines derartigen Aufbaus gegenüber LCDs ist die Möglichkeit, die Ansteuerung hinter der Modulationsfläche anzubringen. [SCHM13]

Wie beim LCD wird hier polarisiertes Licht auf eine Flüssigkristallschicht gelenkt und durch diese in seiner Polarisationsrichtung gedreht. Die Umsetzung erfolgt dabei üblicherweise über einen polarisierenden Strahlteiler [SCHM13]. Direkt unterhalb der Flüssigkristallschicht befin-

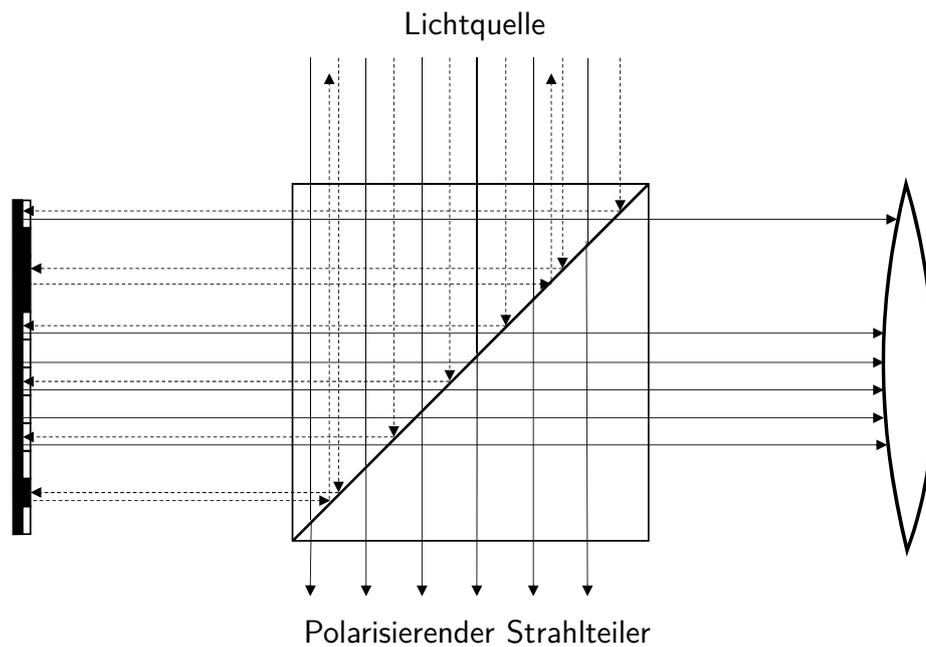


Abbildung 4.4: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise einer Bilderzeugung mit LCoS

det sich eine Aluminiumschicht, die das auftreffende Licht reflektiert. Da die Lichtstrahlen somit zweimal die polarisierenden Flüssigkristalle passieren, erfolgt eine Drehung der Polarisationsrichtung hier lediglich um 45° bei jedem Durchlauf um so in Summe 90° zu erhalten [SCHM13]. Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abbildung 4.4 dargestellt, wobei die durchgezogenen Linien und die gestrichelten jeweils für eine unterschiedliche Polarisationsrichtung stehen.

Der reflektive Einsatz des LCoS ist gegenüber einem LCD vor allem hinsichtlich der thermischen Anbindung vorteilhaft. So kann die Reflexionsschicht direkt mit einem Kühlkörper verbunden werden, während der transmissive Einsatz der Flüssigkristallschicht dies nicht erlaubt. Wird das vor dem LCoS in die beiden Polarisationsrichtungen aufgeteilte Licht auf je einen Modulator gelenkt, kann ein Großteil des Ursprungslichtstroms genutzt und der Systemwirkungsgrad erheblich gesteigert werden. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich allerdings auch durch den Einsatz von zwei LCD-Elementen erzielen.

Die Eigenschaften von LCoS ergeben sich aus der Tatsache, dass das System eine Kombination aus DMD- und LCD-Lösung darstellt. Somit ist auch hier eine abbildende Projektionsoptik erforderlich und die Darstellungsgröße mit der Systemauslegung festgelegt. Vorteil gegenüber den beiden vorherigen Systemen ist allerdings die Flexibilität in der Systemgestaltung, so dass

beispielsweise die Beschichtung der reflektiven Spiegelfläche einfach an das System angepasst werden kann.

Die Darstellung farbiger Informationen erfolgt analog zu DMD und LCD.

Ist – wie bei den vorgestellten Laserlichtquellen – bereits polarisiertes Licht vorhanden, kann auf das erste Polarisationsselement verzichtet und damit eine höhere Systemeffizienz erzielt werden. Damit entfällt auch die Notwendigkeit, zwei Pfade für die Nutzung beider Polarisationsrichtungen aufzubauen. Bedingt durch die Effizienz von Polarisationswechsel und Polarisatoren treten bei LCoS wie auch bei der LCD-Lösung geringere Kontrastwerte verglichen mit den direkt schaltbaren Systemen auf.

4.1.4 LED-Array

Bei der Nutzung eines LED-Arrays als Lichtquelle für einen hochauflösenden Scheinwerfer findet die eigentliche Lichtmodulation nicht unabhängig von der Lichterzeugung statt, wie es bei den anderen vorgestellten Verfahren der Fall ist. Stattdessen werden viele einzelne LED-Chips derart nebeneinander angeordnet, dass eine Lichtmatrix entsteht, bei der jedes Element geschaltet werden kann. Die einzelnen Halbleiterchips werden wie konventionelle LEDs angesteuert. [GRÖT15]

Herausforderung bei dieser Art des Systemaufbaus ist vor allem die Erhöhung der Anzahl einzeln ansteuerbarer Elemente und deren Größe. Werden mehr LEDs in einem Array verbaut, so steigt auch die Anzahl der Zuleitungen für die Ansteuerung und Bestromung. Wegen dieser Zuleitungen können die einzelnen LED-Chips nicht direkt nebeneinander platziert werden und die dadurch entstehende Lücke zwischen den Lichtpunkten muss bei der Systemauslegung berücksichtigt werden.

LED-Arrays mit geringer Auflösung sind zum Teil bereits serienmäßig in Fahrzeugscheinwerfern erhältlich und werden dort als *Matrixlicht* bezeichnet. Diese Scheinwerfer verfügen zurzeit allerdings nicht über eine ausreichende Anzahl von Bildpunkten um im Kontext der hier betrachteten hochauflösenden Systeme eingesetzt werden zu können. [GRÖT15]

Zur Steigerung der Anzahl von Bildpunkten wird im Rahmen einer Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein neuartiges LED-Array unter dem Projektnamen μ AFS entwickelt. Es handelt sich dabei um eine große LED-Fläche mit ein-

zeln ansteuerbaren Segmenten. Ziel der Entwicklung im Projekt ist eine Pixelgröße von $115\ \mu\text{m} \times 115\ \mu\text{m}$ mit einem Abstand von $125\ \mu\text{m}$ zwischen den Bildpunkten (Pixelpitch). Pro Segment ist zur Zeit ein Lichtstrom von 3 Lumen erreichbar. Das gesamte Modul soll aus insgesamt 1.024 Pixeln bestehen und zählt nach der in Abschnitt 2.3.2 angeführten Definition damit noch nicht zu den hochauflösenden Scheinwerfermodulen. Durch Einsatz von mehreren Modulen kann aber sowohl der Lichtstrom als auch die Pixelanzahl erhöht werden, was in Kombination mit einer geeigneten Optik im Projekt μAFS für eine hohe Auflösung sorgen soll. [GRÖT15]

Im Unterschied zu den übrigen Bilderzeugungstechnologien wird beim LED-Array hauptsächlich die Lichtquelle selbst geschaltet, was einen erhöhten Aufwand in der Ansteuerung zur Folge hat, da die hier fließenden Ströme mit etwa 15 mA größer sind als bei Technologien wie LCD oder DMD [GRÖT15]. Vorteilhaft ist dies jedoch für die Systemeffizienz, da nicht benutzte Segmente auch nicht bestromt werden müssen.

Anders als bei den vorher beschriebenen Verfahren erfolgt die Bilderzeugung beim LED-Array direkt über die Lichtquelle. Diese erfordert neben der einzelnen Kontaktierung und Ansteuerung der LED-Chips außerdem eine extra angepasste Primäroptik für jedes einzelne LED-Element, auch wenn die Möglichkeit besteht, diese als Freiformoptik für das gesamte Array auszuführen.

Für eine Farbdarstellung mittels LED-Arrays müssen farbige LED-Chips anstelle der weißen LEDs auf Basis von Leuchtstoffen verwendet werden. Dadurch vergrößern sich sowohl Platzbedarf als auch Ansteuerungsaufwand des Arrays.

Verglichen mit den zuvor aufgeführten flächenbasierten Modulationselementen ist es beim Array jedoch möglich, einzelne Elemente vollständig auszuschalten und so den größtmöglichen Kontrast bereitzustellen.

4.1.5 Rotationsspiegel

Das Grundkonzept der Bilderzeugung mittels eines Rotationsspiegels basiert auf der Anordnung von Spiegelflächen auf einer drehbaren Walze. Ein auftreffender Lichtstrahl wird so je nach Position der Walze unterschiedlich abgelenkt. Auf der in Abbildung 4.5 dargestellten Prinzipskizze ist die Ablenkung eines auf den Spiegel treffenden Laserstrahls in einer Achse zu sehen. TATARTSCHUK UND KREUZER [TATA16] beschreiben ein System, das durch eine

zusätzliche Verkippung der Spiegel in der vertikalen Achse (Drehachse) auch die zweidimensionale Ablenkung des Laserstrahls ermöglicht. Der Rotationsspiegel wird dafür so gefertigt, dass die Spiegelflächen nicht senkrecht zur Strahlachse stehen, sondern leicht schräg dazu. So lässt sich eine Strahlablenkung in zwei Achsen realisieren.

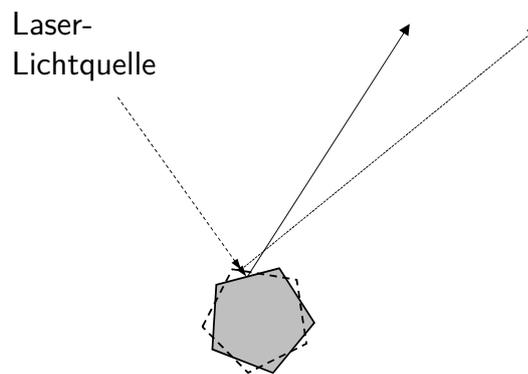


Abbildung 4.5: Funktionsweise einer Bilderzeugung mit Rotationsspiegel

Von der Funktionsweise der Bilderzeugung ist die Strahlablenkung über Rotationsspiegel vergleichbar mit der eines bewegten Mikrospiegels, der in Abschnitt 4.1.6 vorgestellt wird. Der Ablenkspiegel ist lediglich deutlich größer und wird über einen rotierenden Motor angetrieben. Der Einsatz derart mechanisch bewegter Teile birgt gegenüber den elektromechanischen Komponenten ein höheres Ausfallrisiko. Außerdem führt die Größe der Ablenkeinheit zu einer größeren Anfälligkeit des Systems für Schwingungen.

Die von TATARTSCHUK UND KREUZER [TATA16] vorgestellte Lösung verfügt mit drei Laserdioden zur Strahlerzeugung über lediglich 36 Pixel, da mit zwölf Spiegelflächen gearbeitet wird. Soll eine höhere Auflösung umgesetzt werden, ist ein deutlich größerer Bauraum erforderlich [TATA16]. Weiterhin muss die Ansteuerung der Laserdioden mit einer sehr hohen Geschwindigkeit erfolgen.

Bei der Verwendung eines einzigen Rotationsspiegels zur Bilderzeugung ist die mögliche Auflösung damit zu gering für die Projektion hochauflösender Informationen. Durch die Kombination mit einem weiteren Rotationsspiegel oder einem 1D-MEMS könnte diese zwar erhöht werden, beinhaltet aber auch eine zusätzliche Steigerung des Systemaufwands.

Da der Lichtstrahl beim Rotationsspiegel für die Bilderzeugung über die Projektionsfläche geführt wird, kann für jeden erzeugten Bildpunkt eine Farbe vorgemischt auf den Spiegel

gebracht werden. Auf diese Weise sind anders als bei den subtraktiven, flächenmodulierten Systemen weder zusätzliche Modulatoren noch Bilder in den Einzelfarben erforderlich.

Gegenüber allen anderen vorgestellten Verfahren zur Bilderzeugung verfügt der Rotationsspiegel über eine mechanisch bewegte Achse, die für die Bilderzeugung sehr präzise eingestellt und geführt werden muss. Aufgrund der vergleichsweise großen Masse des Spiegels mit Mechanik sind Auswirkungen von Schwingungen auf die Bilderzeugung zu erwarten. Anders als beim nachfolgend vorgestellten MEMS-Scanner ist auch keine dynamische Anpassung des Projektionsbereichs möglich.

4.1.6 MEMS/ MOEMS

Die Begriffe MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) und MOEMS (*Micro-Opto-Electro-Mechanical System*) beschreiben zunächst allgemein sehr kleine Baugruppen oder Bauteile, die Abmessungen in der Größenordnung von Mikrometern aufweisen. Als Komponenten optischer Geräte werden mit dem Begriff meist Mikrospiegel bezeichnet. Hierbei handelt es sich um sehr kleine Spiegelemente, die entweder in einer oder in zwei Achsen beweglich aufgehängt sind. Für die Bilderzeugung wird ein solcher Mikrospiegel derart angesteuert, dass er einen einzelnen Lichtstrahl über die dadurch erzeugte Bildebene führt. Dieses Verfahren wird als *Scannen* bezeichnet und in Kombination mit dem Mikrospiegel ist somit oft von *MEMS Scannern* die Rede. [SCHE09], [COMT99]

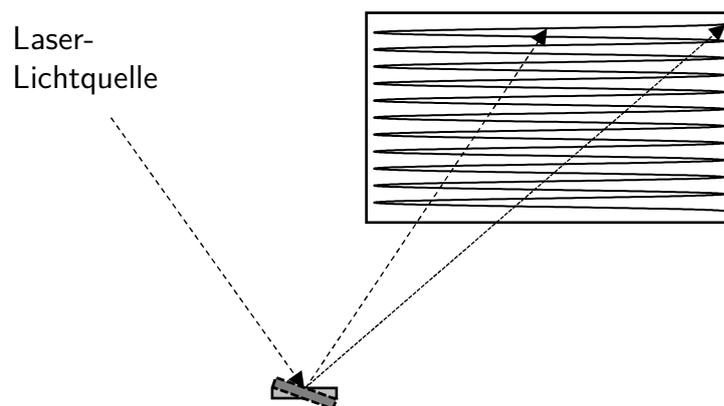


Abbildung 4.6: Funktionsweise der Bilderzeugung mit Mikrospiegel

Für die Betrachtungen im Kontext hochauflösender Beleuchtungssysteme sollen 2D-Mikrospiegel untersucht werden, die sich für die scannende Bilderzeugung eignen. Die vereinfachte Funktionsweise ist in Abbildung 4.6 mit einem Mikrospiegel und einer davon auf-

gespannten Bildebene dargestellt, der Aufbau des zweiachsigen Spiegelements kann Abbildung 4.7 entnommen werden, in der auch dessen kardanische Aufhängung zu sehen ist. Durch die unterschiedlichen Massen der Achsen und die daraus resultierenden Trägheiten wird eine von ihnen als schnelle Achse bezeichnet und eine als langsame. Da die nutzbare Fläche der Mikrospiegel sehr klein ist, wird für den Systemaufbau eine Lichtquelle mit möglichst geringem Strahldurchmesser bei trotzdem ausreichender Intensität benötigt. Die Größe der Spiegelfläche bedingt außerdem eine sehr kleine Étendue der Lichtquelle für eine effiziente Bilderzeugung, so dass MEMS-basierte Scanner üblicherweise in Kombination mit Laserlichtquellen betrieben werden.

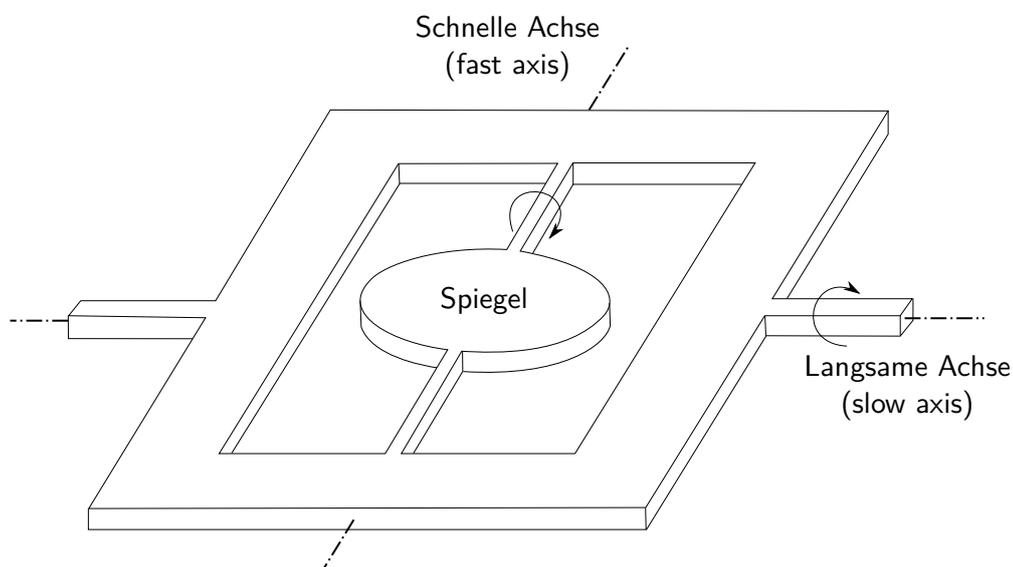


Abbildung 4.7: Prinzipaufbau eines zweiachsigen Mikrospiegels

Die Größe des Mikrospiegels hängt von den Fertigungsverfahren, Beschichtungen und Anwendungsgebieten des Scannersystems ab. Je größer die Spiegelfläche wird, desto träger reagiert das System und desto geringer sind die Möglichkeiten der Informationsdarstellung [SCHE09]. Typische Mikrospiegel weisen Durchmesser von 1 mm bis 1,5 mm auf [YALC06], [SCHE09]. Aufgrund der geringen Abmaße der Spiegeleinheiten ist auch deren Abhängigkeit von der eingebrachten Energie sehr groß. Eine Erwärmung des MEMS führt zu einem veränderten Schwingungsverhalten des Systems und erfordert damit auch eine entsprechende Anpassung der Ansteuerung. Durch die Integration einer Rückführung der Spiegelposition lässt sich eine derartige Regelung der Spiegelansteuerung umsetzen [BAUM12].

Die Systemeffizienz im Hinblick auf den Reflexionsgrad des Spiegels ist stark abhängig von dessen Beschichtung und liegt bei der Verwendung häufig eingesetzter Aluminiumbeschichtung zwischen 70 % und 80 % [HAMA14], kann aber bei der Verwendung von Bragg-Beschichtungen nach NG ET AL. [NG00] bis zu 99 % erreichen.

Die erreichbaren Auslenkwinkel von Mikrosiegeln sind sowohl von der Bauweise des Spiegels also auch von der Ansteuerung der Spiegelachsen abhängig. Typische Werte für die optischen Winkel am Scannerausgang sind bis zu $\pm 10^\circ$ in beiden Achsen, maximal können bis zu 65° umgesetzt werden [YALC06]. Diese Winkel bestimmen dann auch direkt das aufspannbare Bild, dessen Größe abhängig von der Projektionsdistanz ist.

Verglichen mit den flächenbasierten Bilderzeugern wie den zuvor genannten LCD- oder DMD-Lösungen bietet ein Mikrospiegel-Scanner Vorteile in der Auslegung des optischen Systems hinter dem Bilderzeuger. Da die Verwendung eines geführten Laserstrahls in jeder Ebene eine scharfe Abbildung erzeugt, ist die Auslegung eines abbildenden optischen Systems nicht notwendig. [SCHE09]

Für den Einsatz in hochauflösenden Scheinwerfern kann der Laserstrahl durch die Verwendung eines MEMS Scanners direkt auf die Straße gebracht und so das gewünschte Bild erzeugt werden. Dafür muss das auftreffende Laserlicht bereits die für den jeweiligen Bildpunkt gewünschte Farbe haben. Dies kann durch die Kombination mehrerer Dioden erreicht werden, wie es in Abschnitt 2.2.2 beschrieben ist. Für dieses Konzept ist dann ein zusätzliches optisches System zur Mischung der verschiedenen Laserstrahlen und zur Farbeinstellung erforderlich, was in Abschnitt 5.4 näher betrachtet wird.

Eine andere Herangehensweise ist das Abscannen einer Leuchtstoffmatrix mit einem einfarbigen Laser im blauen oder ultravioletten Wellenlängenbereich. Der jeweils angestrahlte Punkt auf der Leuchtstoffmatrix emittiert dann das gewandelte, meist weiße Licht. Ein derartiges System wird beispielsweise von GUT ET AL. [GUT14b] und PETERSEN ET AL. [PETE15] beschrieben. Für eine Farbdarstellung müssen hier aber entweder mehrere Spiegel eingesetzt werden, oder die farbigen Bilder müssen – vergleichbar mit DMD-Systemen – nacheinander erzeugt werden.

Beim Einsatz kombinierter Laserdioden zur Farberzeugung besteht die zuvor beschriebene Möglichkeit, auf ein abbildendes optisches System zu verzichten, da das Bild durch den gerichteten Laser direkt erzeugt werden kann. Damit ist das erzeugte Bild in jeder Ebene scharf und somit nicht abhängig von der Projektionsentfernung oder Unebenheiten auf der Projekti-

onsfläche. Bei der Verwendung eines Konverters muss jedoch aufgrund von dessen Abstrahleigenschaften eine Projektionsoptik vorgesehen werden.

Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung eines Mikrospiegelsystems ist die dynamische Anpassung der Bildgröße während der Projektion. Dies ist möglich, da sowohl Frequenz als auch Amplitude der Spiegelansteuerung während der Laufzeit verändert werden können. Unter Berücksichtigung der Trägheiten von Spiegel und Rahmen sowie der relevanten Eigenfrequenzen kann die Bildgröße dadurch sehr flexibel eingestellt werden. Eine Verringerung der Projektionsfläche bei gleichbleibender Laserleistung erhöht somit beispielsweise die Beleuchtungsstärke. Bei den übrigen vorgestellten Systemen kann insbesondere die Projektionsgröße nur während der Auslegung des Systems angepasst werden, im Betrieb hingegen ist dies nur über Verluste oder zusätzliche mechanische Elemente erreichbar.

Der Einsatz mehrerer Laserdioden als Lichtquelle ermöglicht es, das System zur Darstellung von Farben einzusetzen. Die Farbe wird hierzu wie auch beim Rotationsspiegel für jeden Bildpunkt als Mischung der einzelnen Dioden eingestellt und dann direkt projiziert. Dies stellt einen Gegensatz zur Farberzeugung bei vielen DMD-Systemen dar. Hier werden die Bilder der einzelnen Grundfarben in schneller Abfolge nacheinander erzeugt und entsprechend der benötigten Intensität über den Bilderzeuger gedimmt. Die gewünschte Farbe ergibt sich durch die Trägheit des Auges erst in der Summe der Bilder. Durch das subtraktive Dimmen über den Bilderzeuger ist der Wirkungsgrad geringer als bei einem Scanner, der die Zielfarbe für jeden Bildpunkt einzeln mischt.

Da der Laserstrahl bei einem MEMS-Aufbau geführt wird, ergibt sich der Kontrast aus der Schaltung der Laserdioden und ist damit – wie zuvor beim LED-Array erläutert – sehr hoch.

4.2 Konzeptvergleich anhand eines Konstruktionskataloges

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Konzepte zur Umsetzung hochauflösender Scheinwerfer werden nun in Tabelle 4.1 in Form eines Konstruktionskataloges zusammengefasst und gegliedert. Als Gliederungsebenen dienen dazu die Bilderzeugung, die flächenmoduliert oder strahlmoduliert erfolgen kann, wie auch die Form der Lichterzeugung mit einem solchen System. Eine additive Lichterzeugung bedeutet, dass die einzelnen Bildpunkte immer

nur dann eingeschaltet sind, wenn sie benötigt werden und ansonsten ausgeschaltet sind. Bei einer subtraktiven Lichterzeugung hingegen wird der maximal mögliche Lichtstrom des Systems durch eine Lichtquelle zur Verfügung gestellt und durch das bilderzeugende Element an bestimmten Stellen reduziert.

Die vorgestellten Technologien bilden den Hauptteil des Kataloges und der Zugriffsteil beinhaltet die Eigenschaften des Systems, anhand derer eine Lösung ausgewählt werden kann. Die Kriterien im Zugriffsteil für den Konstruktionskatalog zur Bilderzeugung sind in den vorangegangenen Abschnitten hergeleitet.

Die verwendbare Lichtquelle stellt den ersten Vergleichsaspekt dar. Abhängig von der Modulatorfläche und der Art der Bilderzeugung sind entweder LED- oder Laserlichtquellen sinnvoll. Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, lassen sich LEDs zwar auch verwenden, wenn eine sehr kleine Étendue erforderlich ist, sie führen allerdings zu einem sehr geringen Systemwirkungsgrad und sind deshalb nicht bei den strahlmodulierten Systemen aufgeführt. Laserdioden lassen sich hingegen auch bei flächenmodulierter Bilderzeugung einsetzen.

Ein weiteres Bewertungskriterium ist die Art der Farberzeugung, da der Aufbau eine Darstellung farbiger Bilder ermöglichen soll. Wie in den vorherigen Abschnitten aufgeführt, besteht die Möglichkeit, für jeden Bildpunkt direkt eine Mischfarbe über verschiedenfarbig emittierende Dioden zu erzeugen. Dieses Verfahren lässt sich in Verbindung mit dem LED-Array, dem Rotationsspiegel und dem RGB-Scanner einsetzen. Für die subtraktive Flächenmodulation können die Bilder in den einzelnen Farben entweder räumlich getrennt durch eigene Bilderzeuger für jede Farbe oder zeitlich versetzt über ein einziges Element erzeugt werden. Für den Scanner in Kombination mit einem Leuchtstoff müssen drei verschiedene Leuchtstoffe eingesetzt werden, es handelt sich also auch um eine räumliche Trennung der Farberzeugung.

Die Unterscheidung zwischen LEDs und Laserdioden als Lichtquelle ergibt sich aus den Anforderungen der beiden Verfahren sowohl im Hinblick auf die Ansteuerung als auch die Kontaktierung der Dioden. Die Wirkungsgrade verfügbarer Laserdioden liegen mit etwa 25 % deutlich unter denen von LEDs (siehe dazu Abschnitt 2.2.1). Deshalb und aufgrund der verfügbaren Bauformen ist die thermische Anbindung von Laserdioden gegenwärtig eine größere Herausforderung als dies bei LEDs der Fall ist. Verglichen mit LEDs lassen Laserdioden jedoch wegen der geringeren Étendue und der hohen Energiedichte den Aufbau deutlich kompakterer optischer Systeme zu.

Beim Einsatz von scannenden Mikrosiegeln eröffnet sich die Möglichkeit, die Projektionsfläche dynamisch an die Anforderungen anzupassen. Da der Ausgangslichtstrom dabei konstant bleibt, führt eine Verringerung der Fläche zu einer höheren Beleuchtungsstärke, was bei helleren Umgebungen einen Vorteil darstellt.

Einige der optischen Konzepte erfordern ein zusätzliches optisches System, um das erzeugte Bild auf die Straße zu projizieren. Diese Notwendigkeit entfällt lediglich bei der Nutzung eines direkten, strahlgeführten Laseraufbaus. Der Verzicht auf eine Projektionsoptik bietet insbesondere Vorteile hinsichtlich des Bauraums und der Systemeffizienz.

Wichtiges Auslegungskriterium für ein Projektionssystem ist die erreichbare Auflösung des erzeugten Bildes. Diese ist durch die aufwendige Leitungsführung bei dem Diodenarray am geringsten und für die bereits am Markt erhältlichen Flächenmodulatoren sehr hoch. Bei der Verwendung eines strahlmodulierten Systems ist die Auflösung in großem Maße von der Schaltgeschwindigkeit der Lichtquelle und den Bewegungsgeschwindigkeiten der Ablenkeinheit abhängig. Im Fall der angestrebten Ansteuerung mit drei Laserdioden und einem 2D-Mikrospiegel ist theoretisch eine sehr hohe Auflösung möglich, wie in Abschnitt 3.2.4 hergeleitet. Die Auflösung ist beim MEMS-Scanner mit einem Leuchtstoff durch den entstehenden Emissionspunkt und dessen Abstrahleigenschaften etwas geringer.

Für die Bewertung des Kontrasts ist bei Beleuchtungssystemen am Fahrzeug insbesondere wichtig, welche minimalen Beleuchtungsstärken erreicht werden können, um gegebenenfalls Teile der Projektionsfläche nicht zu beleuchten. Bei additiven Systemen kann die Lichtquelle in diesem Fall ausgeschaltet werden, so dass hier der beste Wert erreicht wird. Für den MEMS-Scanner mit Konverter ist der Kontrast dennoch geringer als bei DMD, LCD und LCoS, da es am Leuchtstoff zum Übersprechen benachbarter Bildpunkte kommt. Mit einem DMD kann theoretisch auch das gesamte Licht eines Bildpunkts aus der Verteilung genommen werden, hier kommt es jedoch zu den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen thermischen Effekten, die eine Reduzierung des Kontrasts zur Folge haben.

Dies gilt ebenfalls für den Wirkungsgrad der Bilderzeugung, der stark von der Beschichtung und den optischen Eigenschaften der verwendeten Elemente abhängt. Als Wirkungsgrad wird für die vorliegende Betrachtung das auf den Bilderzeuger fallende Licht mit dem austretenden verglichen. Lediglich beim MEMS-Spiegel mit Konverter muss der Konverter als Teil des Bilderzeugers betrachtet werden, um Verluste durch den Leuchtstoff und durch die

lambert'sche Abstrahlung berücksichtigen zu können. Ein Vergleich der Wirkungsgrade von Bilderzeugungskonzepten für die Fahrzeugtechnik auf Basis von DMD und Mikrospiegeln wird von REISINGER ET AL. [REIS15] durchgeführt. Das vorgestellte Ergebnis zeigt einen besseren Wirkungsgrad für den Mikrospiegelaufbau gegenüber dem DMD-Aufbau, basiert jedoch auf einer leuchtstoffkonvertierten Laserdiode für den Mikrospiegel. Wird kein zusätzlicher Konverter eingesetzt, ist demnach von einem höheren Wirkungsgrad auszugehen.

Der Einsatz mechanisch bewegter Elemente sollte aufgrund der Schwingungen am Fahrzeug und wegen der Herausforderungen hinsichtlich der Dauerfestigkeit der Bauteile vermieden werden.

Auf Grundlage der zuvor aufgeführten Kriterien wird für die Umsetzung ein Mikrospiegel mit RGB-Laserdioden als Lichtquelle verwendet. Dies erfolgt insbesondere wegen der Möglichkeit, Farbe direkt zu erzeugen und in Kombination mit der variablen Projektionsgröße gezielt einzusetzen. Weiterer Vorteil des RGB-Scanners ist die scharfe Abbildung in jeder Ebene sowie der erreichbare optische Wirkungsgrad bei der Bilderzeugung.

Tabelle 4.1: Konstruktionskatalog der Bilderzeugungsverfahren für den Einsatz in hochauflösenden Scheinwerfern

Gliederungsteil		Hauptteil		Zugriffsteil						
Bilderzeugungsprinzip	Lichterzeugungsprinzip	Technologie	Lichtquelle	Farberzeugung	Projektionsfläche	Projektionsoptik	Auflösung	Kontrast	Wirkungsgrad	mechanisch bewegte Elemente
Flächenmodulation	additiv	Diodenarray	LED/ LD	direkt	konstant	ja	gering	hoch	hoch	keine
		DMD	LED/ LD	zeitlich/ räumlich getrennt	konstant	ja	hoch	mittel	gering	keine
		LCD	LED/ LD	zeitlich/ räumlich getrennt	konstant	ja	hoch	gering	mittel	keine
Strahlmodulation	additiv	LCoS	LED/ LD	zeitlich/ räumlich getrennt	konstant	ja	hoch	gering	mittel	keine
		MEMS-Scanner RGB	LD	direkt	variabel	nein	variabel (hoch)	hoch	hoch	keine
		MEMS-Scanner Leuchtstoff	LD	räumlich getrennt	variabel	ja	variabel (mittel)	mittel	mittel	keine
		Rotationsspiegel	LD	direkt	konstant	nein	variabel (gering)	hoch	hoch	Rotation

5 Auslegung des scannenden Laserprojektionsmoduls

Aus den Konzepten zur Erzeugung hochauflösender Lichtverteilungen im Verkehrsraum eignet sich nach den vorangegangenen Betrachtungen die Technologie des RGB-Scanners am besten für die Darstellung farbiger Symbole vor dem Fahrzeug. Aus diesem Grund wird ein Prototyp für die Umsetzung der Technologie aufgebaut und im Folgenden näher betrachtet. In den Abschnitten 2.3 und 3.1 sind Potenziale und Ziele von lichtbasierter Fahrerassistenz aufgeführt. Von den dort angesprochenen Einsatzgebieten liegt der Fokus des aufzubauenden Systems auf der Informationsprojektion im Bereich vor dem Fahrzeug. Zusätzlich zu aktuell verfügbaren und gesetzlich erlaubten Systemen wird außerdem die Möglichkeit der Darstellung von Farben angestrebt. Genauere Anforderungen sind in Kapitel 3 hergeleitet und beschrieben.

Kernelement des optischen Systems ist die für die Bilderzeugung verwendete Einheit. Mögliche Elemente zur Bilderzeugung sind in Abschnitt 4.1 aufgeführt und hinsichtlich der relevanten Eigenschaften bewertet. Die Auswahl der Bilderzeugung erfolgt nach der Bewertung von Konzepten in Abschnitt 4.2. Für den hier verwendeten Demonstratoraufbau wird ein strahlgeführtes System mit einem Mikrospiegel in Kombination mit Laserdioden als Lichtquelle eingesetzt.

Damit kann eine farbige Projektion umgesetzt werden und gleichzeitig besteht die Möglichkeit, im Betrieb eine Anpassung der Projektionsfläche vorzunehmen. Wie zuvor ausgeführt, bieten scannende Mikrospiegel weiterhin hohe Kontraste für das erzeugte Bild und aufgrund der direkten Bilderzeugung auch eine scharfe Projektion unabhängig von der Entfernung des Bildes.

Der Laserscanner ermöglicht darüber hinaus eine Farbmischung, bei der für jeden Bildpunkt die gewünschte Farbe eingestellt und projiziert werden kann. Dieses Verfahren bietet insbesondere gegenüber der Farbmischung über ein einziges DMD-Element Effizienzvorteile, da dort für jede Farbe ein Bild erzeugt werden muss.

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der Auslegung des Projektionssystems mit einem Mikrospiegel als Bilderzeuger. Ansteuerung und Farberzeugung werden dazu genauer untersucht und bewertet. Aufbauend auf den Ergebnissen wird ein Konzept für das optische System des scannenden Projektors erarbeitet und vorgestellt.

5.1 Systemkonzept

Ziel der aufgebauten Projektionseinheit ist der Betrieb in einem Fahrzeug, so dass auch eine Schnittstelle zur Fahrzeugarchitektur für zukünftige dynamische Versuche vorgesehen werden muss. Die Struktur der angestrebten Bilderzeugung mit Anbindung an die Fahrzeugsignale ist in Abbildung 5.1 abgebildet.

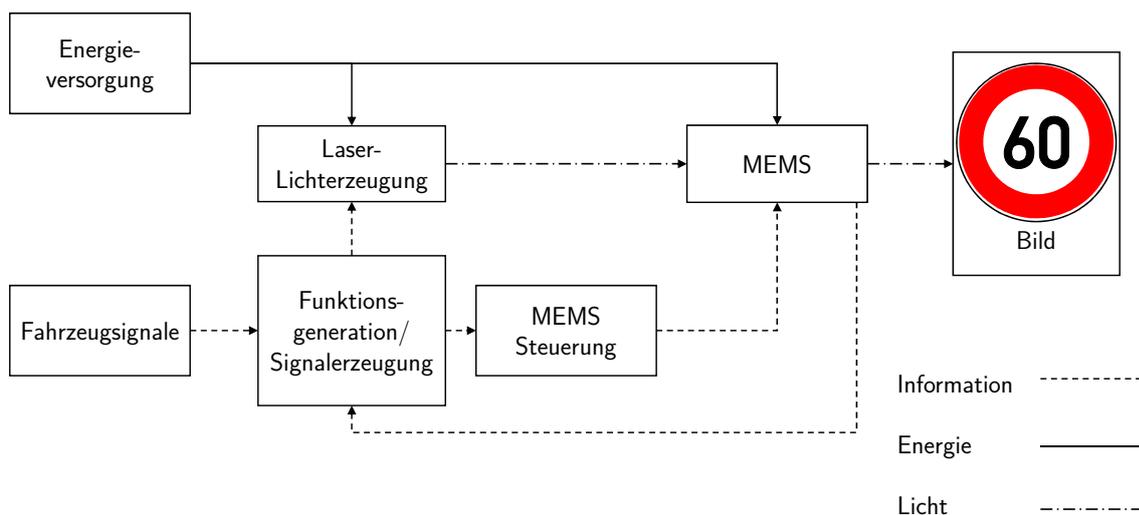


Abbildung 5.1: Konzept für das Scannersystem

Das System ist in das Gesamtsystem Fahrzeug eingeordnet und bekommt von dort sowohl Energie als auch Zustandsdaten, auf deren Basis die Bilderzeugung erfolgt. Kernelement des optischen Systems ist die Laserlichterzeugung, die aus diesem Grund noch gesondert dargestellt in Abbildung 5.2 zu sehen ist.

Auf Grundlage von Fahrzeugsignalen über den aktuellen Zustand und über die Umgebungsbedingungen wird das anzuzeigende Bild im Block *Funktionsgeneration/ Signalerzeugung* generiert. Dies geschieht im ersten Schritt der Umsetzung, indem feste Bilder vorgegeben werden, ohne dynamisch veränderliche Größen aus dem Fahrzeug und seiner Umgebung zu berücksichtigen. In einem weiteren Schritt können diese Signale beispielsweise von einem zentralen

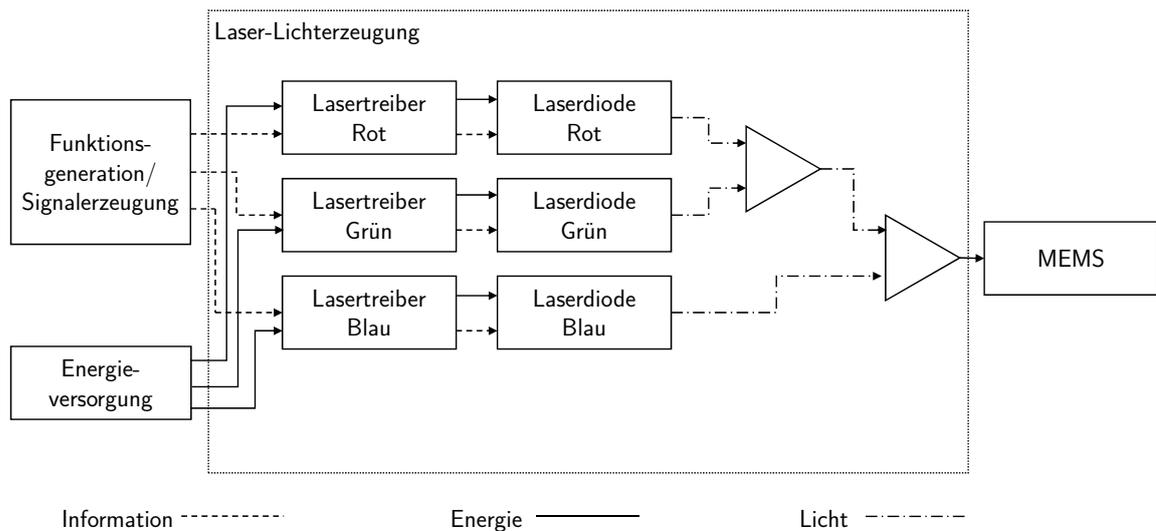


Abbildung 5.2: Laserlicht- und Bilderzeugung im Scanneraufbau

Fahrzeugcomputer in Form von anzuzeigenden Symbolen an das System übermittelt und dann projiziert werden.

Für die Bilderzeugung ist ein synchronisiertes Signal an die Laserdioden und den Mikrosiegel notwendig. An den Stellen der kontinuierlich abgefahrenen Bahn des Spiegels, die Teil des Bildes sein sollen, muss die jeweils benötigte Laserdiode angeschaltet sein. Hieraus ergeben sich weitere Anforderungen an die Lasertreiber, die in Abschnitt 5.7 näher erläutert sind.

Die Information für das zu erzeugende Bild wird in jeweils ein Signal für die Spiegelsteuerung und eines für die Lichterzeugung in jeder Diode erstellt. Eine gute Farbmischung und ein großer Farbraum ist mit den Grundfarben rot, grün und blau zu erreichen (siehe dazu Abschnitt 2.2.2).

Auf Grundlage der vorgestellten Systemstruktur wird im Folgenden der Aufbau einer Umsetzung dargestellt. Anhand dieses Aufbaus kann das grundsätzliche Systemkonzept in Kapitel 6 validiert und darauf aufbauend das Potenzial von scannenden Scheinwerfersystemen evaluiert werden.

5.2 Konzepte zur Mikroskopiesteuerung

Die Wahl der Mikrospeleinheit zur Bilderzeugung und deren Ansteuerung hat große Auswirkungen auf die verwendbaren Konzepte und Komponenten des restlichen Systems. Aus den vorhergehenden Untersuchungen ergibt sich ein zweidimensional ansteuerbarer Mikroskopie als

Bilderzeugungseinheit für die angestrebte Informationsprojektion. Ein solcher Spiegel lässt sich auf verschiedene Arten ansteuern, die nachfolgend weiter untersucht und bewertet werden.

5.2.1 Ansteuerung resonant-resonant

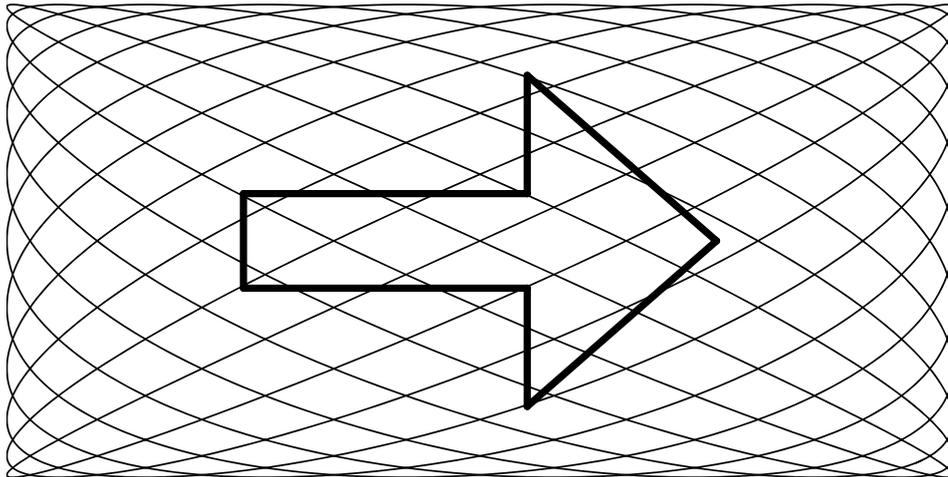


Abbildung 5.3: Beispieldarstellung einer resonant-resonanten Ansteuerung nach [KLOP16b]

Bei den betrachteten Mikrosiegeln handelt es sich um schwingfähige Systeme, wobei aufbaubedingt unterschiedliche Resonanzfrequenzen in den beiden Achsen vorliegen. Werden die Achsen mit einem Sinussignal angesteuert, das der Resonanzfrequenz der jeweiligen Achse entspricht, ergibt die Bahn des Spiegels eine sogenannte Lissajous-Figur. Eine beispielhafte Abbildung der Spiegelbahn ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Soll mit dieser Spiegelsteuerung ein Bild dargestellt werden, so muss die Ansteuerung des Lasers so mit der des Spiegels synchronisiert werden, dass der Laser bei jedem darzustellenden Bildpunkt je nach Ziel ein- oder ausgeschaltet wird. Die Resonanzfrequenzen liegen im ein- bis zweistelligen Kilohertz-Bereich, was eine entsprechend hochfrequente Laseransteuerung bedingt (siehe dazu Abschnitt 5.7). [GU-S14], [HOFM13]

Je nach verwendetem Ansteuerungssignal wird sich die Spiegelgeschwindigkeit aufgrund der Massenträgheit in etwa sinusförmig verhalten und somit in den Umkehrpunkten des Signals langsamer sein als in den Punkten dazwischen. Die Folge ist, dass der Laser länger auf einer Stelle verweilt und das Bild an dieser Stelle somit heller wird. Bei der resonant-resonanten Ansteuerung ist durch den Sinus in beiden Achsen also der gesamte Randbereich heller als die Bildmitte.

5.2.2 Ansteuerung quasistatisch-resonant

Wie bei der vorher aufgeführten resonant-resonanten Ansteuerung wird für einen quasistatisch-resonant betriebenen Mikrospiegel eine der Achsen in ihrer Resonanzfrequenz angesteuert. Die andere Achse wird dagegen aber im quasistatischen oder auch direkten Modus betrieben und die Ansteuerung erfolgt über ein Sägezahnsignal mit geringer Frequenz.

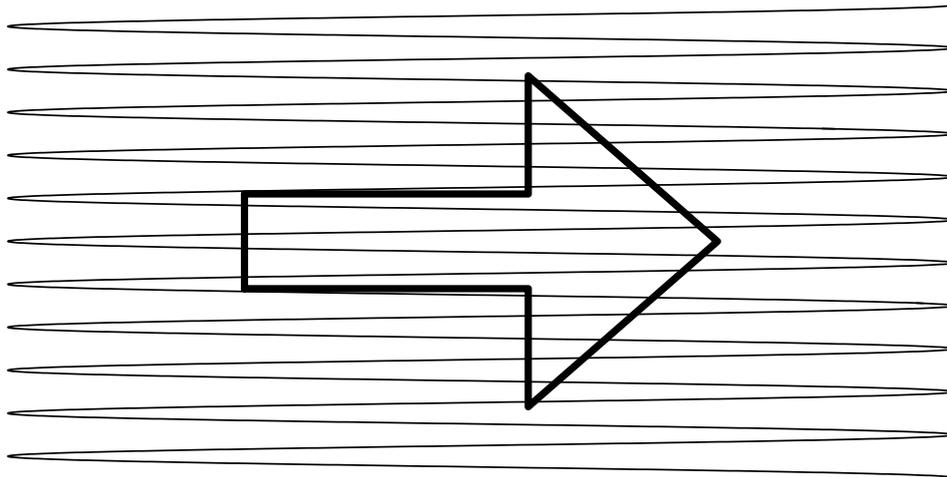


Abbildung 5.4: Ansteuerung quasistatisch-resonant nach [KLOP16b]

Das Bild wird somit zeilenweise abgefahren wie in Abbildung 5.4 dargestellt. Auf diese Weise entspricht die Frequenz der quasistatischen Achse der Bildwiederholfrequenz und liegt beispielsweise bei 100 Hz, wie für den hier angestrebten Aufbau gefordert. Durch die verwendete Ansteuerung über ein Sägezahnsignal können die längeren Verweilzeiten des Lasers in den Randbereichen quasistatischen Achse vermieden werden und damit auf die beiden Ränder der resonanten Achse reduziert werden. Weiterhin ist allerdings eine sehr hohe Schaltgeschwindigkeit für die Laserdiode notwendig um eine hohe Auflösung zu erreichen, wie in Abschnitt 3.2.4 hergeleitet.

5.2.3 Ansteuerung quasistatisch-quasistatisch

Eine weitere Möglichkeit der Bilderzeugung mit einem Mikrospiegel ist die quasistatisch-quasistatische oder auch direkte Ansteuerung. Bei dieser Variante wird die Position des Mikrospiegels direkt eingestellt. Hierzu wird für jede Achse eine Spannung vorgegeben, die zur gewünschten Spiegelposition führt. Um ein Bild zu erzeugen muss eine Bahn aus mehreren Vorgabepositionen erzeugt werden und diese Bahn wird dann wiederholt abgefahren, so dass

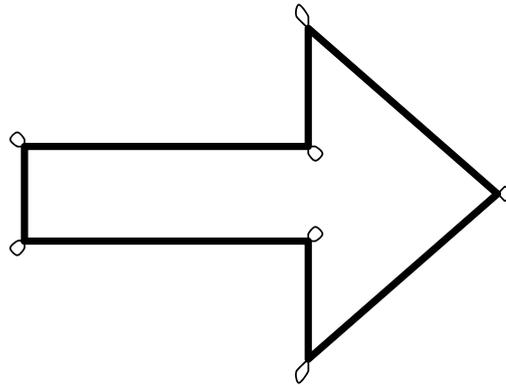


Abbildung 5.5: Beispielhafte Darstellung für eine quasistatisch-quasistatische Ansteuerung nach [KLOP16b]

für den Betrachter ebenfalls der Eindruck eines Bildes entsteht. Der Laser muss bei dieser Variante nahezu gar nicht ausgeschaltet werden, so dass die Anforderungen an die Schaltgeschwindigkeit des Lasers deutlich geringer sind. Lediglich in einigen Umkehrpunkten muss die Lichtquelle ausgeschaltet sein, was in Abbildung 5.5 durch dünne Linien dargestellt ist.

Da der Laser fast permanent angeschaltet ist, verteilt sich die verfügbare Strahlungsleistung auf das darzustellende Bild (siehe Abbildung 5.5). Die Helligkeit bzw. Intensität der Darstellung ist lediglich von der beleuchteten Fläche abhängig. Ein großes Symbol ist somit pro Flächenelement dunkler als ein kleines. Bei der resonant-resonanten und der quasistatisch-resonanten Ansteuerung ist im Gegensatz dazu für jeden Bildpunkt immer die gleiche Laserleistung verfügbar und der Laser ist für die Bildpunkte, die dunkel bleiben, ausgeschaltet. Der quasistatisch-quasistatische Betrieb ermöglicht somit die größtmögliche Nutzung der vorhandenen Laserleistung und bietet damit die größte Systemeffizienz und den einfachsten Systemaufbau.

Durch die direkte Ansteuerung der Spiegelachsen muss allerdings für jedes darzustellende Bild ein eigener Pfad erstellt werden. Damit ist insbesondere die Darstellung flächiger Ausleuchtungen mit dieser Methode nicht sinnvoll möglich.

5.3 Auswahl eines Scanners

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Umsetzung eines RGB-Laserscanners bestehend aus einem 2D-Mikrospiegel und einer RGB-Laserlichtquelle behandelt. Dies ergibt sich aus dem darzu-

stellenden Farbraum aus den Anforderungen in Abschnitt 3.2.3 und dem Ziel, Informationen mit hohem Kontrast direkt vor das Fahrzeug zu projizieren.

Insbesondere aufgrund der angestrebten Darstellung von flächigen Symbolen sind die resonant-resonante sowie die quasistatisch-resonante Ansteuerung des Mikrospiegels sinnvoll. Wie zuvor beschrieben, ist eine homogene Ausleuchtung der Projektionsfläche bei der quasistatisch-resonanten Ansteuerung einfacher zu gestalten, da nur eine Achse mit einem hochfrequenten Sinussignal angesteuert wird. Die Umsetzung einer entsprechenden Ansteuerung wird in Abschnitt 5.7 betrachtet.

Tabelle 5.1: Bewertung von scannenden Bilderzeugungskonzepten für die Erzeugung hochauflösender Bildprojektionen

	Mikrospiegel		
	resonant-resonant	quasistatisch-resonant	quasistatisch-quasistatisch
Großflächige Symbole	+	+	-
Dynamische Anpassung der Projektionsfläche	-	o	+
Homogenität bei Flächenausleuchtung	o	+	-
Kantendarstellung	-	o	+
Optischer Wirkungsgrad Gesamtbild	-	o	+
Ansteuerung Lichtquelle	-	o	+

Zwar liegen Vorteile der direkten Strahlführung über eine quasistatisch-quasistatische Ansteuerung in der präzisen Darstellung von Kanten und der einfachen Ansteuerung der Lichtquelle, die für die Bilderzeugung nahezu dauerhaft angeschaltet sein kann, jedoch entfällt mit dieser Ansteuerungsart die Möglichkeit der Flächendarstellung. Sollten dennoch flächige Symbole mit lokal unterschiedlich farbigen Bildpunkten erzeugt werden, ist der gleiche Aufwand wie für eine quasistatisch-resonante Ansteuerung notwendig und auch die Bilderzeugung erfolgt wie bei den beiden Ansteuerungen mit Resonanzbetrieb.

Auf Grundlage der zuvor erarbeiteten Eigenschaften der drei Ansteuerungsarten, die in Tabelle 5.1 zusammengefasst sind, ist ein Mikrospiegel mit quasistatisch-resonanter Ansteuerung für ein Funktionsmuster zur Umsetzung der Informationsprojektion am besten geeignet. Ein

entsprechendes Mikrospiegelmodul ist als Entwicklungsmuster erhältlich und kann, wie in Abbildung 5.6 abgebildet, in den Versuchsaufbau integriert werden.

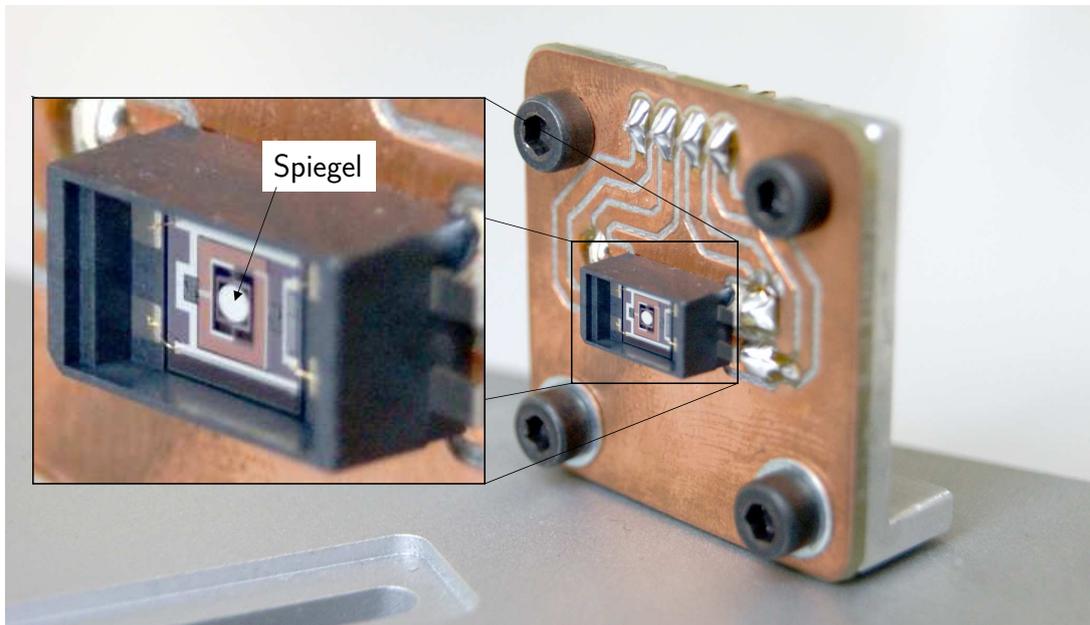


Abbildung 5.6: Foto des Scanneraufbaus

Es handelt sich bei dem Modul um einen Mikrospiegel mit zweiachsiger Auslenkung, bei dem die horizontale Achse (slow axis) eine Verkippung des Spiegels um $\pm 5^\circ$ erlaubt, was zu einer optischen Gesamtauslenkung von $\pm 10^\circ$ führt. In vertikaler Richtung kann das Spiegelement um $\pm 7,5^\circ$ verkippt werden und damit eine optische Ablenkung des Strahls von $\pm 15^\circ$ erzielt werden. [HAMA13], [HAMA14]

Die verwendete Spiegelfläche ist elliptisch mit Durchmessern von 1 mm in der einen und 0,9 mm in der anderen Achse, was die relevante Größe für die Auslegung der Laserstrahlführung darstellt.

5.4 Aufbau des optischen Systems zur Farbmischung

Für den Aufbau eines scannenden Lasersystems mit einem Mikrospiegel ist neben der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Spiegelsteuerung auch die Farberzeugung und -mischung von Bedeutung. Um die Eigenschaften des Lasers möglichst vollständig zu erhalten soll für den Aufbau die in Abbildung 2.8-C dargestellte Kombination aus mehreren farbigen Dioden eingesetzt werden. Auf diese Weise können Bilder flexibel in vielen Farben dargestellt werden, wobei die Einstellung der gewünschten Farbe über die Anpassung der Laserintensitäten erfolgt. Für die Erzeugung der Farbmischung und Strahlkombination existieren verschiedene Verfahren, von denen sinnvoll anwendbare Lösungen im Folgenden erläutert werden. [FAN05]

5.4.1 Lichtleiter

Bei einem Lichtleiter handelt es sich um ein lichtdurchlässiges Bauelement, das dazu dient, Licht durch Totalreflexion an den Innenflächen des Lichtleiterkerns von einem Punkt zu einem anderen zu transportieren. Das Licht einer Lichtquelle wird dazu auf einer Seite unter einem geeigneten Auftreffwinkel in den Lichtleiter eingekoppelt, um die Totalreflexion im Inneren des Lichtleiters zu ermöglichen. Dieser Winkelbereich wird auch als Akzeptanzwinkel bezeichnet. Das Licht wird dann im Inneren an den Grenzflächen zur Ummantelung reflektiert und bleibt so im Lichtleiter um wieder eine Grenzfläche zu erreichen. Wird eine Grenzfläche unter einem Winkel getroffen, der keine Totalreflexion bewirkt, so tritt das Licht aus dem Lichtleiter aus. Dies geschieht in vielen Anwendungsfällen am Ende des Bauteils.

Um das Licht mehrerer Lichtquellen durch einen Lichtleiter zu kombinieren und zu homogenisieren, muss es bereits in einem vorgemischten Strahlenbündel vorliegen um innerhalb des Akzeptanzwinkels für den Lichtleiter zu liegen. In den meisten Fällen ist dies entweder aufgrund der Ausdehnung der Lichtquelle selbst oder aufgrund der Ansteuerung und Kühlung der Lichtquelle nur über zusätzliche optische Elemente umsetzbar. In diesem Fall muss entweder eine zusätzliche Strahlmischung erfolgen oder es muss ein spezieller Lichtleiter eingesetzt werden, der über mehrere Eingangselemente und einen gemeinsamen Ausgang verfügt. Derartige Lichtleiter werden über das sogenannte *Spleißen* erzeugt, bei dem die Fasern der einzelnen Eingänge zu einem einzigen Strang zusammengefügt werden [YABL05].

Aufgrund der diffusen Abstrahlcharakteristik am Lichtleiterausgang ist für die weitere Verwendung des emittierten Lichts ein zusätzliches optisches Element wie etwa eine Linse erforderlich.

Ein Spezialfall des Lichtleiters ist der sogenannte Integration Rod. Es handelt sich dabei um einen festen Lichtleiterstab beispielsweise aus Glas. Materialkombination und Form des Bauteils sind darauf ausgelegt, das jeweils eingekoppelte Licht möglichst homogen zu durchmischen, wobei dies einer Vergrößerung der Étendue gegenüber den einfallenden Lichtstrahlen zur Folge hat [BONE16]. Wie Linsen und Spiegel ist ein Integration Rod bei verschiedenen Herstellern von Standardkomponenten mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften erhältlich und wird beispielsweise in Videoprojektoren eingesetzt.

5.4.2 Dichroitische Spiegel

Dichroitische Spiegel basieren auf dem Effekt, dass bestimmte Beschichtungen zu einer Reflexion gewisser Wellenlängen führen, während sie für andere Bereiche transmissiv sind. Ein Beispiel für diese Transmissions- und Reflexionseigenschaften ist in Abbildung 5.7 abgebildet. Es wird dabei zwischen den beiden Polarisationsrichtungen des Lichts unterschieden in p-Polarisation (\parallel) und s-Polarisation (\perp), was besonders beim Einsatz bereits polarisierter Laserstrahlung relevant ist. Die Graphen zeigen jeweils den Anteil transmittierter Strahlung über der Wellenlänge (Abbildung 5.7-A) beziehungsweise den reflektierter Strahlung (Abbildung 5.7-B) für den Auslegungsfall mit einem Einfallswinkel von 45° . Andere Winkel führen zu einer geringeren Transmission oder Reflexion. Die Abbildungen verdeutlichen die sogenannte Grenzwellenlänge des Spiegelements, die für den dargestellten Fall bei 567 nm liegt. Wellenlängenbereiche unterhalb dieser Grenzwellenlänge werden im dargestellten, sichtbaren Bereich vornehmlich reflektiert. Die darüber liegenden Wellenlängen werden hingegen hauptsächlich transmittiert.

Dichroitisch beschichtete Elemente sind als Standardkomponenten in vielen Ausführungsformen von diversen Herstellern erhältlich. Sie bestehen meist aus einer Trägerschicht beispielsweise aus Glas, die mit einer teildurchlässigen Spiegelschicht bedampft ist. Auf diese Spiegelschicht wird eine dielektrische Schicht und dann eine weitere Spiegelschicht aufgetragen, wobei die Schichtdicke der dielektrischen Schicht für das wellenlängenabhängige Filterverhalten des Spiegels verantwortlich ist. Die eingesetzten Schichtdicken liegen üblicherweise im Bereich zwischen 10 nm und 1000 nm. [BAUM04]

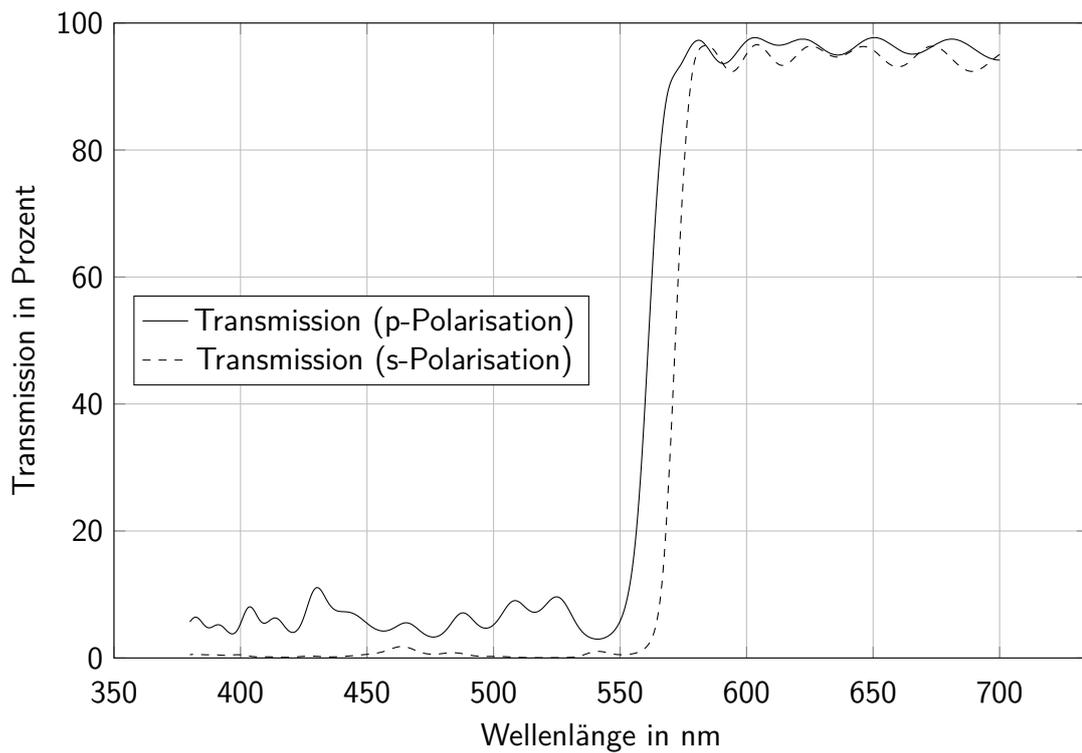
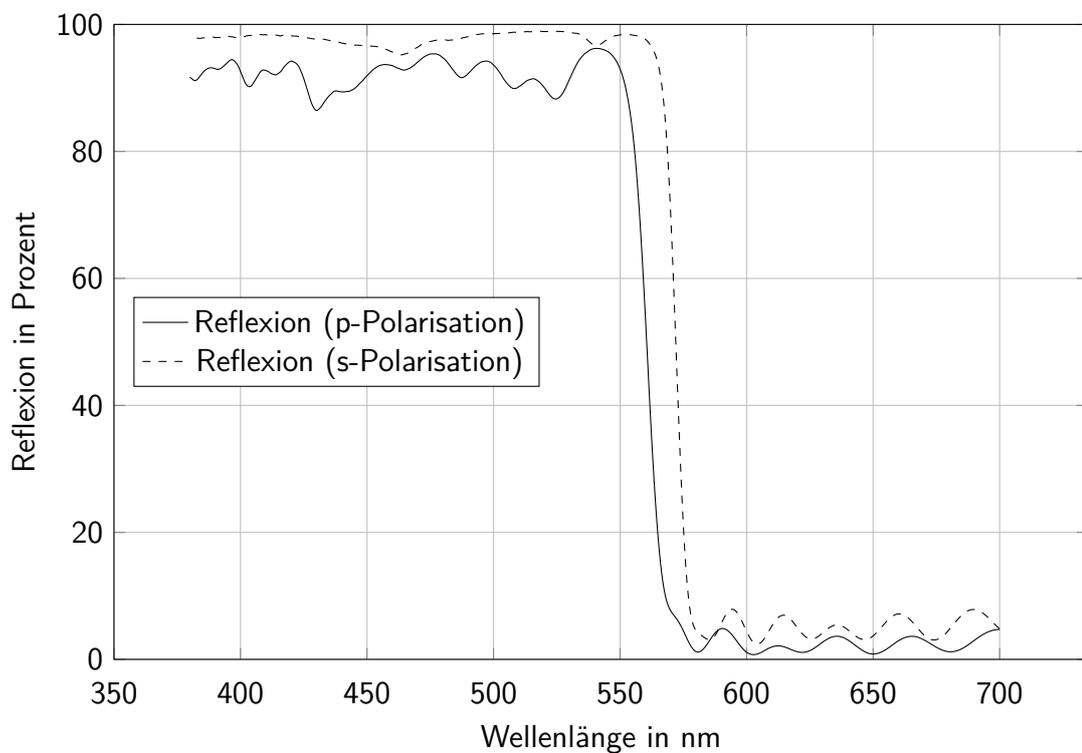
**A** Transmission**B** Reflexion

Abbildung 5.7: Polarisationsabhängige Eigenschaften eines dichroitischen Spiegel am Beispiel von Thorlabs DMLP567T für unter 45° einfallende Strahlen im Wellenlängenbereich von 380 – 700 nm nach [THOR17]:

A - Transmission von Strahlung; B - Reflexion von Strahlung

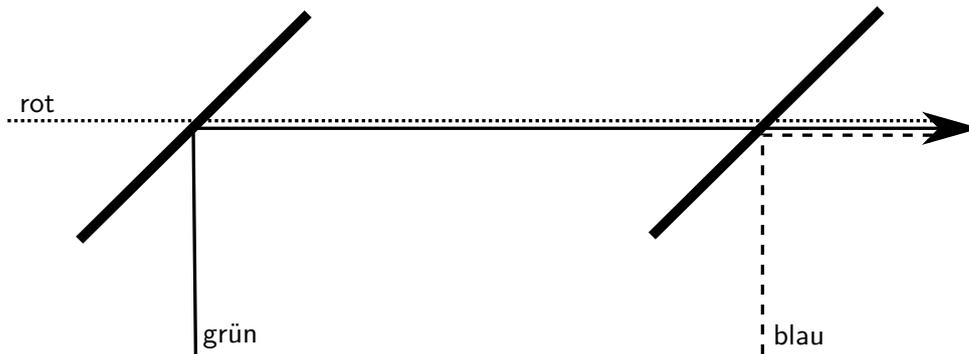


Abbildung 5.8: Kombination von rotem, grünem und blauem Licht aus zwei dichroitisch beschichteten Spiegeln

Zur Erzeugung einer Lichtmischung aus zwei Lichtquellen mittels dichroitischer optischer Elemente müssen diese so gewählt werden, dass das Licht der einen Lichtquelle reflektiert wird, während das der anderen durchgelassen wird. So kann mit den in Abbildung 5.7 abgebildeten Eigenschaften eine Kombination von rotem und grünem Licht erreicht werden. Während das grüne Licht reflektiert wird, wird das rote transmittiert. Durch die Beleuchtung des Spiegels von beiden Seiten lassen sich die beiden Strahlen übereinanderlegen. Der linke Teil des in Abbildung 5.8 skizzierten Aufbaus stellt eben diese Situation dar. Eine Vermischung dieses rot-grünen Lichtstrahls mit einem blauen ist im weiteren Verlauf dargestellt. Hierzu ist ein dichroitischer Spiegel mit einer geringeren Grenzwellenlänge erforderlich. Für das Hinzufügen einer weiteren Farbe wird dann entsprechend noch ein zusätzlicher Spiegel benötigt.

Aufgrund des modularen Aufbaus einer Strahlkombination über dichroitische Spiegel, ist das resultierende System entsprechend flexibel gestaltbar. Die einzelnen Spiegel können sowohl in ihrer Position als auch in ihrer Lage im Raum mit geeigneten Bauelementen frei eingestellt werden. Ebenso können einzelne Spiegelemente problemlos ausgetauscht und an Änderungen im Aufbau, wie beispielsweise eine neue Lichtquelle, angepasst werden.

5.4.3 Dichroitische Prismen

Eine spezielle Form des Prinzips der dichroitischen Spiegel sind sogenannte dichroitische Prismen, die mehrere spektral selektive Beschichtungen in einem Bauelement vereinen. Die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlängen werden dadurch unterschiedlich im Bauteil reflektiert oder transmittiert und als Kombination entsteht der gemischte Strahl. Verschiedene Hersteller haben unterschiedliche Verfahren entwickelt, die Spiegelemente zu kombinieren, meist direkt angepasst auf ihre jeweilige Anwendung. Häufig werden solche optischen Elemente als so-

nannter *Combiner Cube* in Videoprojektoren eingesetzt um entweder das Licht einer weißen Lichtquelle aufzuspalten oder mehrfarbige LEDs zu einem weißen Licht zu kombinieren. Zwei Beipielausführungen sind in Abbildung 5.9 dargestellt.

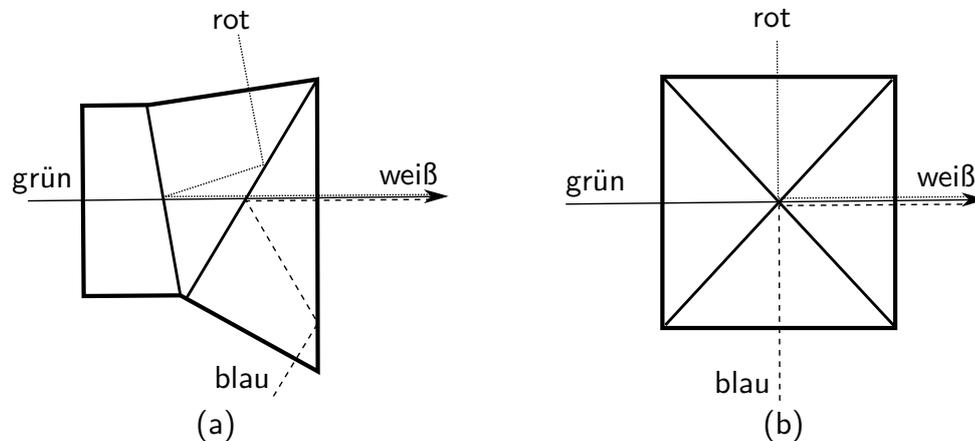


Abbildung 5.9: (a) Trichroitische Prismenanordnung; (b) Prismenwürfel (X-Cube)

Durch die fixe Anordnung der optischen Flächen in einem Element entfällt beim dichroitischen Prisma die Möglichkeit der Strahleinstellung. Die auf die Prismenanordnung fallenden Strahlen müssen deshalb an den Lichtquellen oder durch zusätzliche Spiegelelemente so eingestellt werden, dass sie sich exakt überlagern. Damit wird entweder der optische Wirkungsgrad reduziert oder der mechanische Aufbau aufwendiger.

5.4.4 Versetzte Diodenanordnung

Im engeren Sinne liegt bei der versetzten Diodenanordnung keine Strahlkombination vor und das Konzept kann nur in Kombination mit einer strahlmodulierten Bilderzeugung eingesetzt werden. Die einzelnen Lichtstrahlen treffen dabei mit unterschiedlichen Winkeln auf den Bilderzeuger auf, der zum Beispiel ein Mikrospiegel sein kann. Aus den Informationen zur jeweiligen Position des Mikrospiegels und den daraus resultierenden Bildkoordinaten kann über die Lasersteuerung der benötigte Laser angeschaltet werden. Die verschiedenfarbigen Lichtquellen erzeugen also nicht gleichzeitig denselben Bildpunkt sondern zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Auf diese Weise ist der Systemaufbau sehr einfach gestaltet, die Laseransteuerung allerdings ist weitaus aufwendiger. Außerdem kann das Bild nur in dem Bereich erzeugt werden, den alle Farbstrahlen erreichen, der erzeugbare Bildbereich ist also reduziert.

5.4.5 Dispersives optisches Element

Auf Basis der unterschiedlichen Brechung verschiedener Wellenlängen beim Materialübergang ist eine Strahlkombination auch über ein Prisma oder ein ähnliches dispersives optisches Element möglich [FAN05]. Da die Brechungswinkel für die Wellenlängenbereiche nur geringfügig unterschiedlich sind, müssen die Dioden für eine Strahlüberlagerung sehr eng nebeneinander angeordnet werden. Als Alternative kann der Strahlengang entsprechend verlängert oder Umlenkspiegel eingesetzt werden.

5.4.6 Diffraktives optisches Element

Eine weitere Methode, Lichtquellen verschiedener Farben zu vermischen, ist die Verwendung diffraktiver Strukturen. In ihrer bisherigen Anwendung werden diese Elemente verwendet, um weiße Lichtquellen für die Spektroskopie in die einzelnen Wellenlängenbereiche zu zerlegen. Wie bei den anderen Komponenten auch, lässt sich dieser Effekt umkehren und so zur Farbmischung nutzen.

Die diffraktiven optischen Elemente, die dabei zum Einsatz kommen, sind mit Mikrostrukturen versehene Optiken, die durch die Strukturierung auf verschiedene Wellenlängen unterschiedlich wirken, beispielsweise indem Interferenzmuster entstehen. Bei geeigneter Wahl der Strukturen lassen sich die Strahlen der verschiedenen Wellenlängen somit derart beeinflussen, dass eine Farbüberlagerung erfolgen kann. [COLE00], [BONE13]

5.4.7 Auswertung der Farbmischung

Die zuvor beschriebenen optischen Konzepte zur Kombination verschiedenfarbiger Laserdioden zur Erzeugung eines gemischten, farbigen Lichtpunkts auf einer Projektionsfläche lassen sich nach der Art der Strahlenkung aufteilen. Lichtleiter und darauf basierende Technologien sowie die versetzte Diodenanordnung bewirken die Durchmischung der Ursprungsstrahlen über die Form des Umlenkelements, so dass diese Art als geometrisch bezeichnet werden kann. Die Technologien, die auf dichroitischer Beschichtung, dispersiven oder diffraktiven Elementen aufbauen, nutzen für die Strahlenkung spektrale Effekte, bei denen das Licht abhängig von der Wellenlänge unterschiedlich gebrochen oder reflektiert wird.

Nach den in Abschnitt 3.5 zusammengefassten Anforderungen ist unter anderem auch die Flexibilität des umgesetzten Aufbaus für zukünftige Erweiterungen relevant, so dass diese sowohl hinsichtlich geometrischer Änderungen als auch in Bezug auf die Lichtquelle für die Auswertung berücksichtigt wird. Ein weiterer relevanter Aspekt ist die systeminhärente Einstellbarkeit der Komponente zur Farbmischung. Da das Ursprungslicht aus mehreren einzelnen Strahlbündeln besteht, müssen Richtung und Position der Strahlen für eine Überlagerung angepasst werden. Dies ist bei der Verwendung direkt in Lichtleiter eingekoppelter Dioden gegeben, da die Lichtleiter nahezu frei im Raum bewegt werden können. Alle anderen Systeme benötigen Einstellmechanismen, die entweder in der Strahlkombination vorgesehen sind oder an den Dioden oder dem Mikroskopspiegel umgesetzt werden müssen.

Für die dichroitischen Spiegel kann beispielsweise jedes Spiegelement einzeln eingestellt werden um so die gewünschte Strahlüberlagerung zu erhalten. Auf diese Weise entfällt eine aufwendige Justage der Dioden, die gegebenenfalls inklusive Treiber und Kühlkörper oder alternativ mit zusätzlichen Spiegeln eingestellt werden müssten. Dies wird notwendig, wenn in der Strahlmischung keine oder zu wenige Freiheitsgrade zur Einstellung vorliegen.

Ein weiteres relevantes Auswahlkriterium für das Projektionssystem ist der Erhalt der Strahleigenschaften. Dabei ist insbesondere im Hinblick auf den Mikroskopspiegel die Erhaltung der Étendue wichtig, die beim Einsatz von Lichtleiter-Technologien vergleichsweise stark erhöht wird.

Aufgrund der hohen Systemflexibilität und der Möglichkeit, viele Elemente im Versuchsaufbau individuell anzupassen, wird der Aufbau des Laserscanners mit dichroitischen Spiegeln zur Farbmischung umgesetzt. Diese haben den zusätzlichen Vorteil, dass sie als Standardkomponenten verfügbar und somit auch bei Bedarf gut austauschbar sind.

Die Verwendung eines RGB-Lichtleiters bietet ebenfalls große Vorteile hinsichtlich der Systemflexibilität, bedingt aber eine aufwendige Einkopplung und auch eine Erhöhung der Étendue.

Das geometrisch am leichtesten zu realisierende System ist die versetzte Diodenanordnung, hier entstehen allerdings Nachteile durch die Reduzierung des möglichen Projektionsbereichs. Weiterhin ist eine aufwendigere Diodenansteuerung notwendig, da die Schaltdauer für einzelne Bildpunkte positionsabhängig ist und bei diesem Konzept jede Diode zum jeweils betrachteten Zeitpunkt einen anderen Bildpunkt erzeugt.

Tabelle 5.2: Konstruktionskatalog zur Farbmischung mit drei Laserioden

Gliederungsteil Prinzip Umlenkung	Hauptteil Technologie	Zugriffsteil					
		Geometrische Flexibilität Aufbau	Spektrale Flexibilität Aufbau	Systeminhärente Einstellbarkeit	Erhalt Strahl- eigenschaften	Scan- bereich	
geometrisch	Lichtleiter	-	+	o	-	+	
		+	o	+	o	+	
	Versetzte Di- odenanordnung	-	+	o	+	-	
		+	+	o	+	+	
spektral	Dichroitische Beschichtung	-	o	-	+	+	
		+	+	o	+	+	
	Dispersives Element	-	-	-	+	+	
		+	-	-	+	+	
Diffraktives Element	-	-	-	+	+		
	+	-	-	+	+		

5.5 Auswahl des optischen Konzepts

Der optische Aufbau des Systems basiert auf dem zuvor ausgewählten Konzept, drei Laser in den Farben rot, grün und blau über dichroitische Spiegel zu einem Strahl zu mischen und diesen über einen Mikrospiegel abzulenken, so dass ein Bild entsteht. Dazu wird ein Strahlengang aufgebaut, wie er in Abbildung 5.10 dargestellt ist.

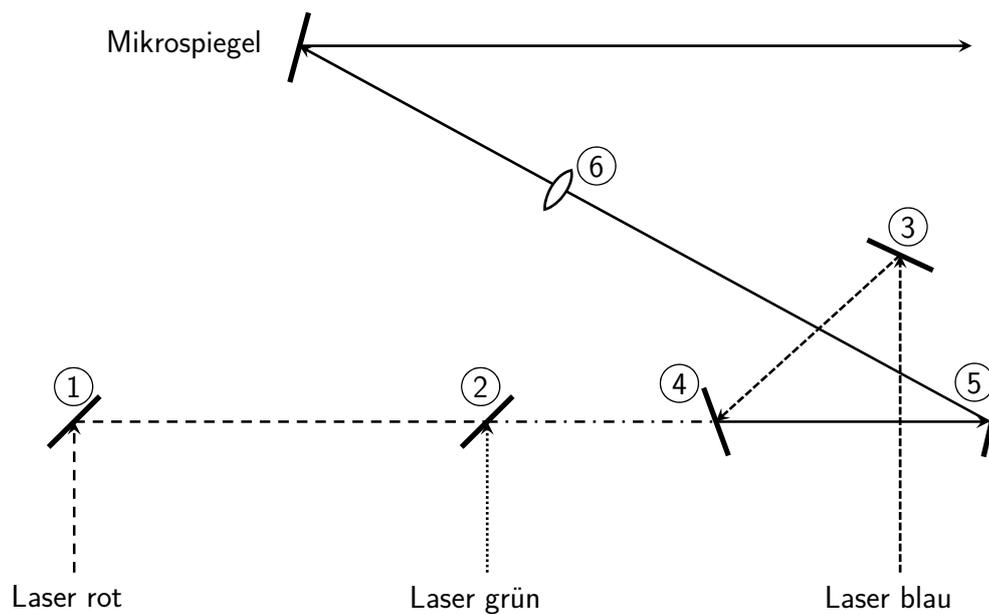


Abbildung 5.10: Strahlengang für den optischen Aufbau

Der Aufbau dient sowohl der Strahlmischung als auch der Lenkung und Fokussierung der gemischten Strahlen auf den Mikrospiegel. Um dies zu erreichen, müssen Einstellmöglichkeiten in den einzelnen Systemkomponenten vorgesehen werden.

Die zur Einstellbarkeit notwendigen Freiheitsgrade ergeben sich aus der Tatsache, dass die drei Laserstrahlen in ihrer Richtung überlagert und auf den Mikrospiegel gelenkt werden müssen. Um eine Überlagerung von zwei Strahlen zu realisieren, müssen diese in der Strahlrichtung im Raum übereinstimmen, was bei einem Strahl die Einstellung von zwei Winkeln gegenüber den Koordinatenachsen bedingt. Da die Strahlen damit nur in die gleiche Richtung zeigen, muss einer von beiden noch zweidimensional in seiner Position angepasst werden, so dass sich insgesamt vier Freiheitsgrade ergeben. Das Hinzufügen eines dritten Strahls führt analog dazu zu weiteren vier Freiheitsgraden. Insgesamt muss für die Überlagerung der drei Laserstrahlen also eine Einstellung von acht Freiheitsgraden vorgesehen werden. Um den kombinier-

ten Strahl schließlich auf dem Mikrospiegel zu positionieren ist eine weitere zweidimensionale Positionierung nötig, was zu insgesamt zehn erforderlichen Einstellmöglichkeiten führt.

Für die Umsetzung dieser Einstellbarkeit werden die drei Laserdioden mit ihren Treibern so angeordnet, dass sie nach den Primäroptiken parallel in eine Richtung strahlen. Für die Strahlmischung und -lenkung sind fünf Spiegelemente vorgesehen (Nr. 1–5). Die Elemente Nr. 2 und Nr. 4 sind dichroitisch beschichtet, so dass an diesen Stellen jeweils eine Farbe hinzugefügt werden kann. Die übrigen Spiegel reflektieren breitbandig und dienen der Einstellung von Richtung und Position des Laserstrahls. Jeder Spiegel ist in zwei Achsen einstellbar, was bei den vorgesehenen fünf Spiegeln zu den erforderlichen zehn Einstellmöglichkeiten für den optischen Pfad führt.

Bei den in Abbildung 5.10 gekennzeichneten Elementen handelt es sich um die folgenden Komponenten:

- 1 Dielektrischer Breitbandspiegel 400 – 750 nm,
Reflexionsgrad $R > 99\%$
- 2 Dichroitischer Spiegel mit Grenzwellenlänge 567 nm,
Reflexionsgrad $R > 95\%$, Transmissionsgrad $T > 90\%$
- 3 Dielektrischer Breitbandspiegel 400 – 750 nm,
Reflexionsgrad $R > 99\%$
- 4 Dichroitischer Spiegel mit Grenzwellenlänge 466 nm,
Reflexionsgrad $R > 98\%$, Transmissionsgrad $T > 95\%$
- 5 Dielektrischer Breitbandspiegel 400 – 750 nm,
Reflexionsgrad $R > 99\%$
- 6 Beschichtete Zylinderlinse, Brennweite $f = 100$ mm,
Transmissionsgrad $T > 99\%$

Für den Einsatz als Projektionssystem soll möglichst viel Licht zur Verfügung stehen um auch bei ungünstigen Umgebungsbedingungen ein Bild erzeugen zu können. Dies könnte durch die Kombination mehrerer gleicher, leistungsstarker Laserdioden erreicht werden. Da die Anzahl der optischen Elemente im System und auch der Steuerungsaufwand dadurch stark ansteigen würden, wird für den Demonstratoraufbau nur eine einzige Diode für jede Farbe verwendet. Dies ist auch aus dem Grund sinnvoll, da so ein möglichst kompakter Systemaufbau realisiert

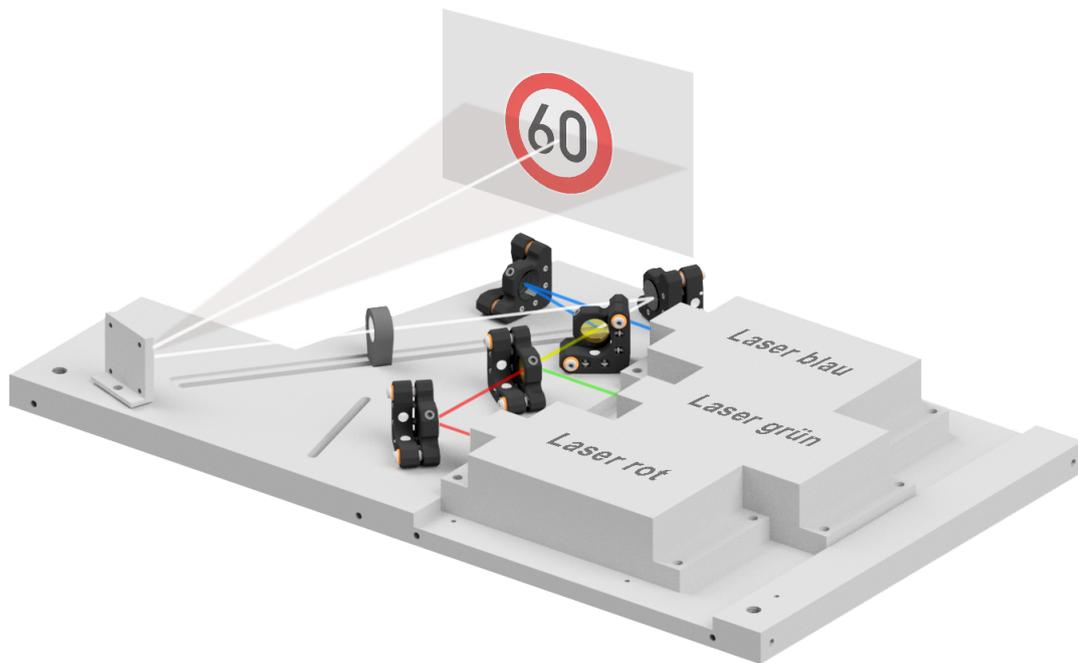


Abbildung 5.11: CAD-Modell vom Gesamtaufbau des Demonstrators

werden kann. Die charakteristischen Merkmale der eingesetzten Dioden sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Tabelle 5.3: Eigenschaften der eingesetzten Dioden

Farbe	Rot	Grün	Blau
Bezeichnung	Arima Lasers ADL63v0-BTP	Osram PLP520	Osram PL-TB450B
Optische Ausgangsleistung	0,5 W	0,15 W	1,6 W
Laserschwelle	200 – 300 mA	140 – 200 mA	200 – 300 mA
Betriebsstrom maximal	900 mA	480 mA	1.500 mA
Emissionswellenlänge	638 ± 6 nm	520 ± 10 nm	450 ± 10 nm
Strahl-Divergenz $\Theta_{\perp,FWHM}$	36°	23°	23°
Strahl-Divergenz $\Theta_{\parallel,FWHM}$	6°	7°	7°
Polarisation	p	s	p

Die in der Tabelle aufgeführten Abstrahlwinkel der Laserdioden machen eine Primäroptik notwendig, die die Strahlen jeder einzelnen Diode vorformt. Üblicherweise werden bei Laserdioden hier Kollimationsoptiken eingesetzt, die das zunächst divergente Licht parallelisieren. Für den vorliegenden Aufbau soll in einiger Entfernung vom Projektor ein Bild auf eine Fläche wie beispielsweise die Straße projiziert werden. Für die Bilddarstellung ist es dabei nicht nachteilig,

wenn der Strahl nach dem Mikrospiegel divergent ist. Insbesondere aus Gründen der Augensicherheit ist ein solches Aufweiten des Strahls vorteilhaft. Aus diesem Grund fokussiert die Primäroptik die jeweiligen Strahlen auf den Mikrospiegel. Weitere Details zur Strahlführung sind in Abschnitt 5.8 aufgeführt, die Lasersicherheit wird in Abschnitt 5.9 näher betrachtet.

Zur Strahlüberlagerung wird, wie bei den Komponenten zuvor aufgeführt, eine Kombination aus zwei dichroitischen Spiegeln verwendet. Der eine weist ein transmissives Verhalten für den Wellenlängenbereich über 567 nm auf und wirkt für die darunter liegenden, sichtbaren Wellenlängen reflektiv. So können der rote und der grüne Laserstrahl überlagert werden. Für die Überlagerung der beiden Strahlen mit dem blauen Laser wird ein dichroitischer Spiegel mit einer Grenzwellenlänge von 500 nm eingesetzt. Eine Modelldarstellung des Aufbaus mit CAD-Geometrien der verwendeten Bauteile ist in Abbildung 5.11 zu sehen. Weiterhin sind die Laserstrahlen und ihre Überlagerung eingezeichnet. Für die weitere Strahllenkung, die nicht der Strahlkombination dient, werden breitbandig reflektierende Spiegel eingesetzt. Diese eröffnen durch ihre Halterungen die zuvor bestimmten Freiheitsgrade für die Einstellbarkeit des Lichtstrahls. [KLOP16a]

Aufgrund der unterschiedlichen Strahldivergenz der Laserdioden in senkrechter und waagerechter Achse sind die eingesetzten, rotationssymmetrischen Primäroptiken nicht ausreichend, um den geforderten, annähernd quadratischen Bildpunkt zu erzeugen. Aus diesem Grund befindet sich eine zusätzliche Zylinderlinse mit einer Brennweite von 100 mm im Strahlengang, die den Laserstrahl nur in einer Achse beeinflusst.

5.6 Eigenschaften der Laserquellen

Bei den eingesetzten Laserdioden handelt es sich um die in Tabelle 5.3 aufgeführten Dioden in den Farben rot, grün und blau. Wie für Laserdioden üblich und in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, weisen diese eine sogenannte Laserschwelle auf, bei der sie beginnen, signifikant optische Leistung zu emittieren. Das stromabhängige Verhalten wird für jede Diode vermessen und ist exemplarisch für die blaue Diode in Abbildung 5.12 für zwei verschiedene Temperaturen am Diodengehäuse dargestellt. Im Diagramm ist die aufgenommene Leistung der Diode sowie die abgegebene Laserleistung aufgetragen und der daraus resultierende Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_{\text{opt}}}{P_{\text{el}}}$ ist ebenfalls eingezeichnet. Für die Messungen wurde eine Diodenaufnahme mit Tem-

peratureinstellung und dazu passendem Lasertreiber ITC4005 der Firma Thorlabs eingesetzt, der den Betriebsstrom I_D mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ im Bereich von 0 A bis 5 A setzt. Für die Erfassung der Laserleistung wird ein thermischer Messkopf S314C ebenfalls von der Firma Thorlabs eingesetzt. Er verfügt über einen Messbereich von 0,25 μm bis 11 μm und eine Messungengenauigkeit von $\pm 5\%$ im relevanten Bereich von 250 nm bis 2940 nm.

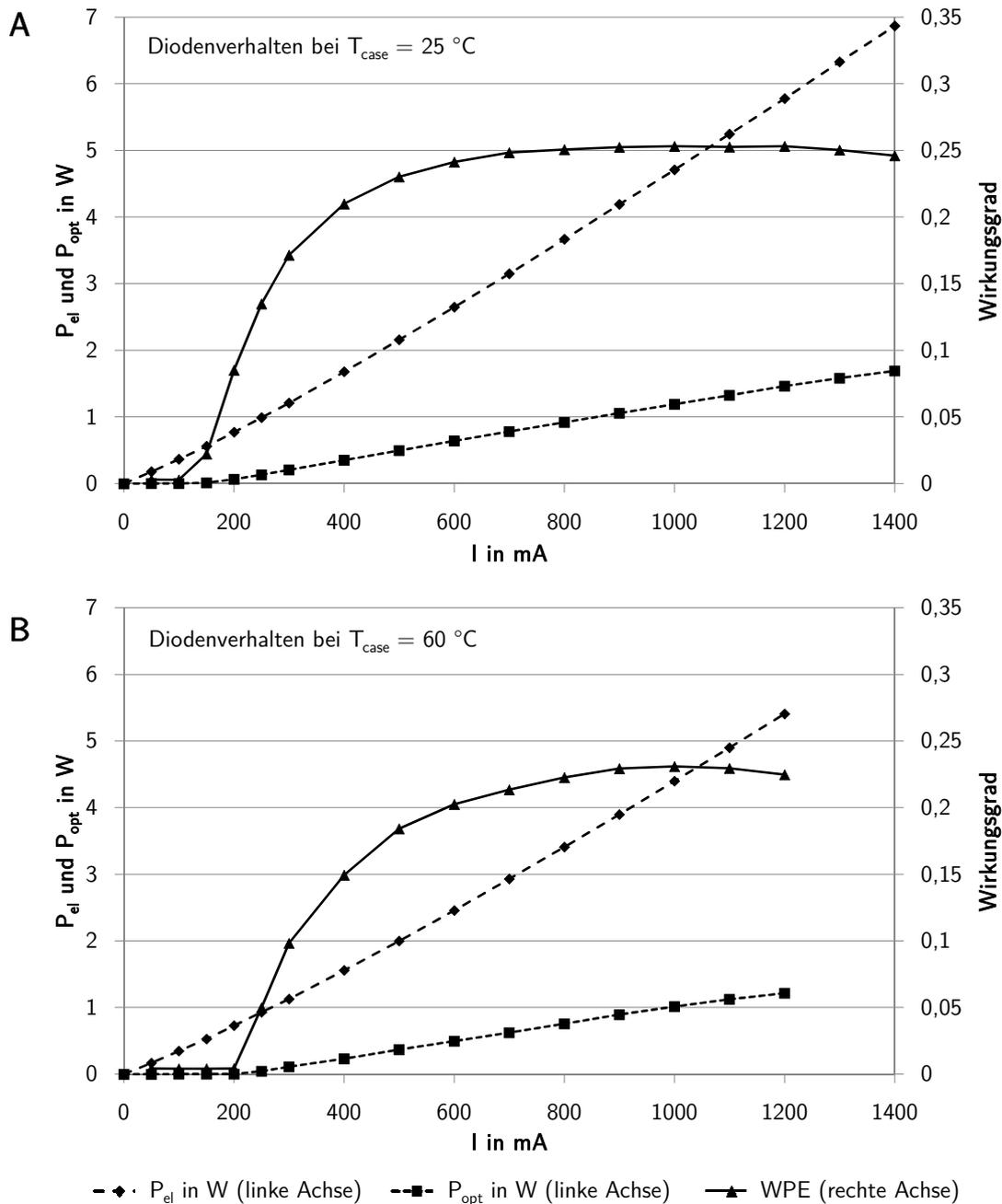


Abbildung 5.12: Stromabhängigkeit von Leistung und Wirkungsgrad der eingesetzten blauen Diode bei A: $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$ und B: $T_{\text{case}} = 60^\circ\text{C}$

Die Laserschwelle ist deutlich erkennbar, ebenso wie auch ihre Temperaturabhängigkeit. So beginnt die Laseremission bei $T_{\text{case}} = 25\text{ °C}$ mit etwa 150 mA Diodenstrom, während sie bei $T_{\text{case}} = 60\text{ °C}$ erst bei etwa 200 mA einsetzt. Ebenso ist der erreichbare Wirkungsgrad bei höherer Gehäusetemperatur geringer. Für die blaue Diode sollte nach Abbildung 5.12 ein Betriebspunkt bei etwa 400 mA Betriebsstrom oder darüber eingesetzt werden und den Bereich geringer Wirkungsgrade und hoher Temperatureinflüsse zu umgehen. Eine entsprechende Messung der grünen Diode ist bereits in Abschnitt 2.2.1 in Abbildung 2.7 aufgetragen und zeigt das gleiche Verhalten. Aufgrund der geringeren maximalen Strahlungsleistung der grünen Diode ist für die meiste Zeit der Anwendung ein Betrieb nahe dem Maximalstrom wahrscheinlich. Für den Fall eines Betriebspunkts mit niedrigerem Strom fällt der Wirkungsgrad unterhalb von etwa 250 mA stark ab. Das gleiche Verhalten zeigt ebenfalls die rote Diode, hier liegen die Minimalwerte ähnlich wie bei der blauen Diode bei etwa 300 mA Schwellstrom.

Tabelle 5.4: Temperaturabhängigkeit von Leistung und Wirkungsgrad der eingesetzten blauen Diode (Osram PL-TB450B) bei $I_{\text{LD}} = 1.000\text{ mA}$ im Bereich von 25 °C bis 50 °C

Gehäusetemperatur in $^{\circ}\text{C}$	elektrische Leistung P_{el} in W	optische Leistung P_{opt} in mW	Wirkungsgrad in %
25	4,65	1050	23
30	4,59	1024	22
35	4,44	996	22
40	4,49	958	21
45	4,45	925	21
50	4,40	884	20

Die Temperaturabhängigkeit der Leistungswerte und des Wirkungsgrads ist in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Messwerte weichen von den in Abbildung 5.12 aufgeführten Punkte geringfügig ab, da zwei unterschiedliche Dioden gleichen Typs vermessen werden. Die Messung der Diodenwerte erfolgt weiterhin im Konstantstrombetrieb (cw). Für den Einsatz im Laserscanner fließt nur zu bestimmten Zeitpunkten Strom, nämlich, wenn ein Bildpunkt erzeugt werden soll. Es ergibt sich also eher das Verhalten bei Pulsbetrieb. Dies hat zur Folge, dass geringere thermische Belastungen auftreten und sich damit auch die Gehäusetemperatur weniger durch die Laserdiode erhöht als im cw-Betrieb. Für den Einsatz in einem Fahrzeug müssen außerdem weitere Wärmequellen wie Sonneneinstrahlung oder Motorabwärme berücksichtigt werden.

5.7 Ansteuerung zur Bilderzeugung

Aufbauend auf den in Abschnitt 4.1.6 beschriebenen Funktionsprinzipien eines Mikrospiegels werden im Folgenden die relevanten Größen für den in Abschnitt 5.3 vorgestellten Mikrospiegel bestimmt und die notwendigen Parameter zur Bilderzeugung ermittelt.

Wie beschrieben verfügt der Spiegel über eine schnelle Achse, die sinusförmig mit ihrer temperaturabhängigen Resonanzfrequenz angesteuert wird, und eine langsame Achse mit einer quasistatischen Ansteuerung über ein Sägezahnsignal. Die schnelle Achse wird für die folgenden Betrachtungen mit x bezeichnet und die dazugehörige Frequenz mit f_x , für die langsame Achse folgt entsprechend f_y für die Mikrospiegelfrequenz. Weiterhin wird die Schaltfrequenz der Laserdiode f_{LD} benötigt sowie der Zeitpunkt t_k , zu dem der betrachtete Bildpunkt k erzeugt werden muss.

Für die Auslegung der Spiegelansteuerung werden dafür die folgenden Werte verwendet, die auf den Anforderungen in Abschnitt 3.2.4 basieren, aber zur Laufzeit der Ansteuerung anpassbar sind:

$$f_x = 22.500 \text{ s}^{-1} \quad (5.1)$$

$$f_y = 100 \text{ s}^{-1} \quad (5.2)$$

$$f_{LD} = 1.000.000 \text{ s}^{-1}. \quad (5.3)$$

Durchgezählt wird abhängig von den gewählten Frequenzen über den Zähler k über alle zur Verfügung stehenden Bildpunkte:

$$t_k = \frac{k}{f_{LD}}, \quad k = \left[1, \frac{f_{LD}}{f_y} \right] \quad (5.4)$$

Daraus ergeben sich abhängig vom betrachteten Bildpunkt die folgenden Spiegelpositionen:

$$x_k = \sin \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_x}{f_{LD} \cdot k} \right) \quad (5.5)$$

$$y_k = \frac{f_y}{f_{LD}} \cdot \left(\frac{f_{LD}}{f_y - k + 1} \right) \quad (5.6)$$

Damit lässt sich die Spiegelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_k bestimmen

$$v_k = \sqrt{\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_x}{f_{LD} \cdot k}\right)^2 + \left(\frac{f_y}{f_{LD}}\right)^2} \quad (5.7)$$

Aufgrund der geringen Frequenz in y -Richtung und der daraus resultierenden minimalen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Zeilen kann der zweite Teil von Gleichung 5.7 vernachlässigt werden. Es ergibt sich somit für die auszugleichende Spiegelgeschwindigkeit:

$$v_k^* = \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_x}{f_{LD} \cdot k}\right) \quad (5.8)$$

Das Verhältnis von Spiegelgeschwindigkeit zur jeweiligen Spiegelposition kann somit als Proportionalitätszusammenhang in der folgenden, vereinfachten Form dargestellt werden:

$$v(k) \propto \cos\left(\frac{1}{k}\right). \quad (5.9)$$

Mit der Vereinfachung von Gleichung 5.5 zu

$$k \propto \frac{1}{\sin^{-1} x_k} \quad (5.10)$$

ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$v(x_k) \propto \cos\left(\sin^{-1} x_k\right) = \sqrt{1 - x_k^2}. \quad (5.11)$$

Um diese Geschwindigkeitsunterschiede über der horizontalen Achse des Bildes auszugleichen, muss die Laserintensität in entsprechendem Maß angepasst werden. Die theoretisch erforderliche Laserintensität für ein homogenes Bild ist in Abbildung 5.13 als relativer Wert über der Spiegelposition aufgetragen.

Für die Bilderzeugung muss das darzustellende Bild entsprechend der zuvor festgelegten Bildparameter (Gleichungen 5.1 – 5.3) in die Bildpunkte k zerlegt werden. Das so erzeugte Feld von Farbwerten muss anschließend mit der zuvor bestimmten Geschwindigkeitsfunktion des Spiegels bewertet werden, um eine homogene Ausleuchtung des Bildes zu erreichen. Die so bestimmten Werte werden in einer Lookup-Tabelle (LUT) abgelegt und bilden so die Vorgabewerte für die Laseransteuerung.

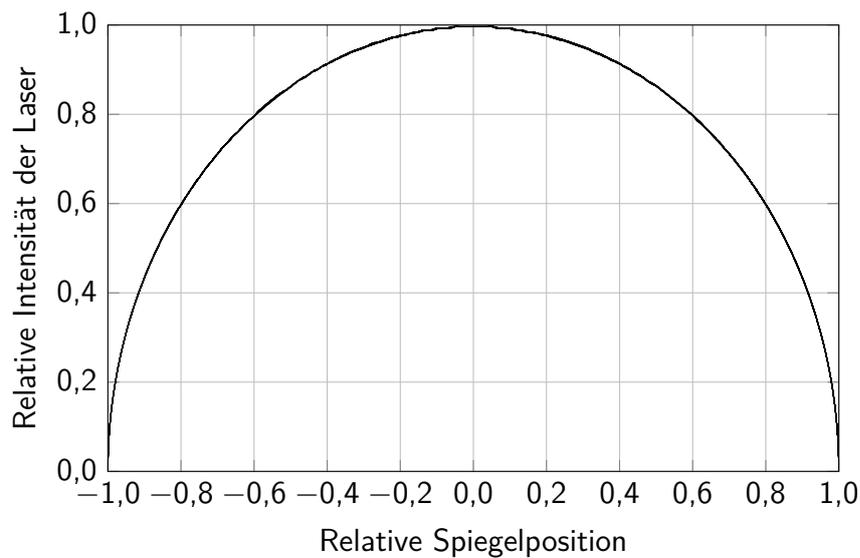


Abbildung 5.13: Benötigte relative Intensität der Laser zur Erzeugung eines homogenen Bildes

Werden die Intensitäten der Laser nicht positionsabhängig angepasst, ist dies an den Bildrändern erkennbar. Da in der Bildmitte große Bereiche mit ähnlichen Spiegelgeschwindigkeiten auftreten, kann die Intensitätsanpassung aber auch vernachlässigt werden, wenn das erzeugte Bild in der Mitte des Projektionsbereichs liegt.

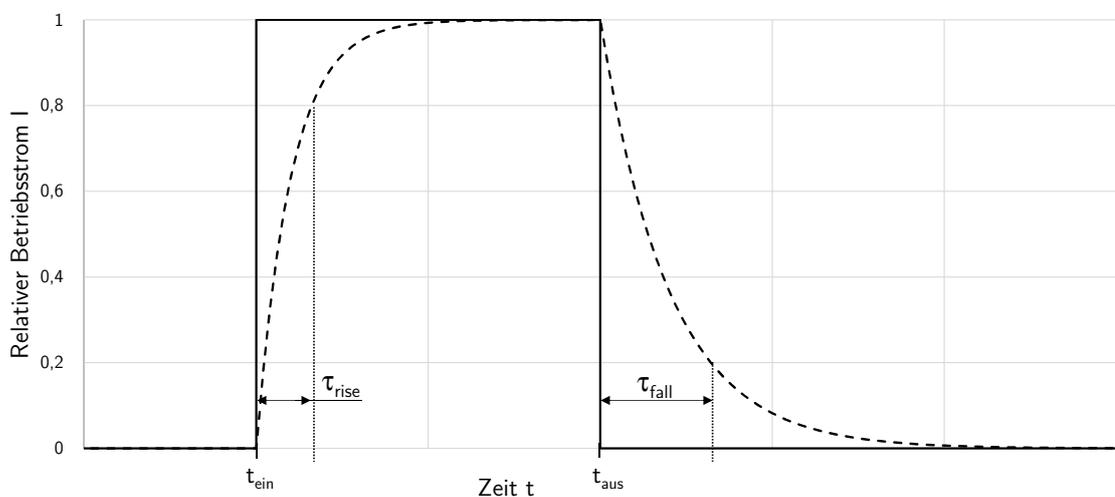


Abbildung 5.14: Zeitabhängiges Schaltverhalten von Laserdioden

Eine große Herausforderung in der Umsetzung bildet zudem die in Abschnitt 5.7 aufgeführte Schaltfrequenz der Dioden f_{LD} . Das typische Verhalten einer Laserdiode beim Ein- und Ausschalten ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Die durchgezogene Linie stellt dort die Stromvorgabe dar, die als ideale Sprungfunktion angenommen wird, während die gestrichelte Linie den tatsächlich an der Diode anliegenden Strom zeigt. Nachdem die Stromvorgabe auf 100 % wechselt, beginnt der Diodenstrom zu steigen, bis er die Vorgabe erreicht. Für die Anwendung

Für einen gut durchmischten und präzisen Lichtpunkt im Bild müssen die Strahlen der einzelnen Dioden ein gleich großes Flächenelement beleuchten und den gleichen Divergenzwinkel am Mikrospiegel besitzen. Um dies zu erreichen, können die Abstände zwischen Dioden und Linsen sowie die Abstände zum Mikrospiegel variiert werden. Das Prinzip ist in Abbildung 5.15 schematisch dargestellt. Zur Veranschaulichung sind die Strahlen der beiden Dioden übereinandergelegt, im tatsächlichen Aufbau hat Linse 2 jedoch keinen Einfluss auf den Strahlengang der Laserdiode LD_1 . Die Überlagerung ist dort über dichroitische Spiegel realisiert und die Strahlkombination erfolgt geometrisch hinter den dargestellten Optiken Linse 1 und Linse 2. Die Simulation erfolgt strahlenoptisch ohne Berücksichtigung der in Abschnitt 2.2 aufgeführten Beugungseffekte und auch Einflüsse durch Fertigungsungenauigkeiten der einzelnen Komponenten werden vernachlässigt. Der real umgesetzte Aufbau muss deshalb über die Möglichkeit verfügen, die Positionen und Abstände der eingesetzten Elemente justieren zu können.

Der Aufbau des Systemmodells erfolgt entsprechend der optischen Pfade nach Abbildung 5.10. Da die Abstrahlwinkel der blauen und der grünen Diode gleich sind (siehe Tabelle 5.3), müssen hier auch gleiche Weglängen gewählt werden. Der größere Abstrahlwinkel Θ_{\perp} in senkrechter Richtung für die rote Diode führt zu einem längeren optischen Pfad um eine Überlagerung mit den anderen beiden sowie einen gemeinsamen Divergenzwinkel nach dem Mikrospiegel zu erreichen.

Gleichzeitig mit der Winkelübereinstimmung muss für die überlagerten Strahlen auch ein gleich großes Abbild der Emissionsfläche als Bildpunkt erzielt werden. Dies wird erreicht, indem das Verhältnis der Abstände s_1 und s_2 zu den Abständen der jeweiligen Linsen konstant gewählt wird.

Als Detektorelemente für die Simulation werden zwei Ebenen definiert: Zum einen ein Element in der Ebene des Mikrospiegels und zum anderen die Bildebene. Daraus können die zwei Ziele für eine Systemoptimierung bestimmt werden. Der kombinierte Strahl soll seinen Fokuspunkt im Mikrospiegel haben und auf der Bildfläche eine homogene Farbverteilung aufweisen. Diese beiden Anforderungen können nun in die Zielfunktion der Optimierung überführt werden. Für die grüne und rote Laserdiode werden zur Simulation vereinfachte Modelle für die Abstrahlcharakteristik in Form eines Gaussprofils mit $4 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ Emissionsfläche verwendet, für die blaue Diode stellt der Hersteller Strahlendaten für Simulationen zur Verfügung.

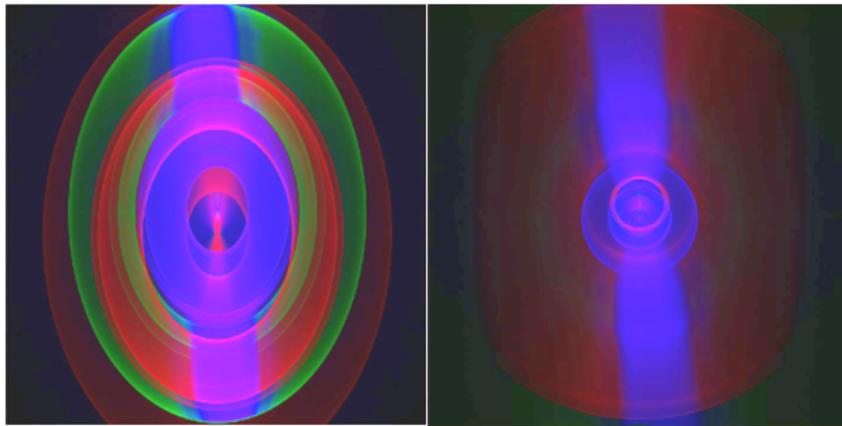


Abbildung 5.16: Simulation der Strahlüberlagerung mit einer sphärischen Linse pro Diode auf dem Mikrospiegel (links, Detektorgröße = 1 mm x 1 mm) und einem Schirm in 5 m Entfernung (rechts, Detektorgröße = 50 mm x 50 mm)

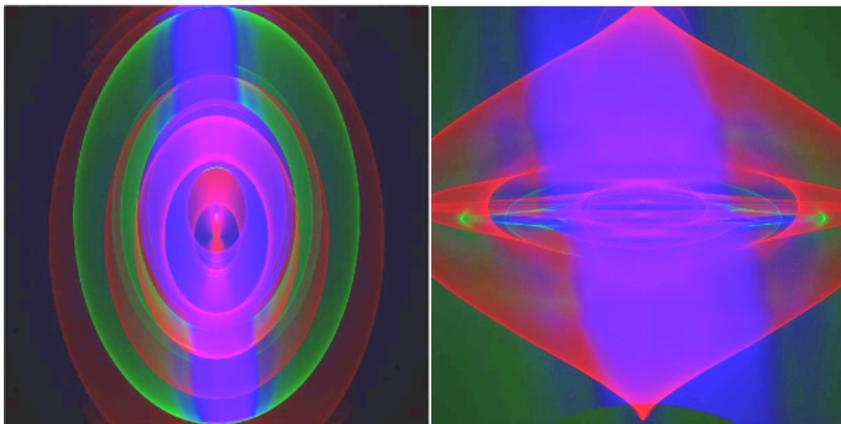


Abbildung 5.17: Simulation der Strahlüberlagerung mit einer sphärischen Linse pro Diode und einer zusätzlichen Zylinderlinse auf dem Mikrospiegel (links, Detektorgröße = 1 mm x 1 mm) und einem Schirm in 5 m Entfernung (rechts, Detektorgröße = 50 mm x 50 mm)

Zunächst wird ein System simuliert, das aus den Laserdioden mit einer sphärischen Linse für jede Diode besteht. Die Ergebnisse für den Mikrospiegel sind auf einem der Spiegelfläche entsprechenden Detektor der Größe 1 mm x 1 mm in Abbildung 5.16 links dargestellt. Rechts ist eine Detektorfläche in 5 m Entfernung mit einer Größe von 50 mm x 50 mm abgebildet, was der angestrebten Größe eines Bildpunkts entspricht. Während die Mikrospiegelfläche zu einem großen Teil ausgeleuchtet wird, zeigt sich am Bildpunkt lediglich ein schmaler Streifen, so dass hier weitere Maßnahmen erforderlich sind.

Aus diesem Grund wird der Aufbau mit einer zusätzlichen Zylinderlinse im Strahlengang simuliert, was zu den in Abbildung 5.17 dargestellten Ergebnissen führt. Während der Laserpunkt auf dem Mikrospiegel nahezu unverändert ist, zeigt sich auf dem Schirm in 5 m Entfernung

ein deutlich breiterer Bildpunkt als zuvor. Für den weiteren Systemaufbau wird deshalb die Zylinderlinse in das System integriert.

Ein weiteres Ergebnis der Simulation ist der optimierte Abstand der einzelnen Laserdioden vom Mikrospiegel unter Berücksichtigung der Primäroptiken für jede Diode und der Zylinderlinse, die in die CAD-Konstruktion des Aufbaus einfließen. Um die Größe des Bildpunkts später noch anpassen zu können, wird die Position der Zylinderlinse variabel gestaltet. So können Linsen mit verschiedenen Brennweiten oder auch andere Linsentypen für weitere Untersuchungen eingesetzt werden.

5.9 Lasersicherheit

Eine wichtige Betrachtung bei der Auslegung von Lasersystemen sind Fragen zur Laser- beziehungsweise Augensicherheit, da die hohe Leistungsdichte von Lasern eine große Gefahr für Menschen und Tiere darstellen kann. Für die Betrachtung der Lasersicherheit können zwei Regelungen herangezogen werden, die im Folgenden näher ausgeführt sind. Dies ist zum einen die Bewertung photobiologischer Risiken gemäß der DIN Norm DIN EN 62471 [DIN62471] und zum anderen die Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments hinsichtlich der Lasersicherheit am Arbeitsplatz.

5.9.1 Photobiologische Sicherheit

Je nach eingesetzter Lichtquelle und Optik gehen von Leuchten verschieden große Gefahren für das menschliche Auge aus. Glühlampen emittieren beispielsweise einen Großteil der Energie in Form von Infrarotstrahlung, die eine thermische Schädigung der Netzhaut zur Folge haben kann. Weiße LEDs basieren oft auf der Kombination von blauen oder ultravioletten LEDs mit einem Leuchtstoff (siehe dazu Abschnitt 2.2.2). Die Gefahr für das Auge besteht hier in einer photochemischen Netzhautschädigung, die eine dauerhafte Beeinträchtigung der Sehleistung zur Folge haben kann. Die angesprochenen Gefahren werden als photobiologische Risiken bezeichnet und sind in DIN EN 62471 [DIN62471] beschrieben. Weiterhin ist dort aufgeführt, wie die Gefahren quantifiziert und eingeordnet werden können.

Risikogruppen und Messverfahren

Für die Einordnung einer Lichtquelle in eine Risikogruppe werden die Grenzwerte nach Tabelle 5.5 herangezogen. Die dort aufgeführten Werte sind Expositionszeiten, über deren Dauer biologisches Gewebe einer entsprechenden Strahlung ohne Schaden ausgesetzt werden kann. Je nach Wellenlänge und Dauer der Bestrahlung erfolgt dann eine Einordnung in die aufgeführten Risikogruppen. Um die Expositionszeit zu bestimmen, wird die Bestrahlungsdichte gemessen und mit einer spektralen Gewichtungsfunktion multipliziert. Lampen, die danach in die *Freie Gruppe* fallen, können als unbedenklich betrachtet werden. Die Risikogruppen 1, 2 und 3 stehen für geringes, mittleres und hohes Risiko für photobiologische Schäden. Auf Produkten der Risikogruppen 2 und 3 muss ein Warnhinweis hinsichtlich der Gefahr durch Strahlung angebracht werden.

Tabelle 5.5: Klassifizierung von Leuchten in Risikogruppen nach DIN EN 62471, Abschnitt 6.1 [DIN62471]

	Freie Gruppe	Risikogruppe 1	Risikogruppe 2	Risikogruppe 3
Aktinische Ultraviolett-Gefahr (200 nm – 400 nm)	> 30.000 s	30.000 s ... 10.000 s	10.000 s ... 1.000 s	< 1.000 s
Nahe UV-Gefahr (315 nm – 400 nm)	> 1.000 s	1.000 s ... 300 s	300 s ... 100 s	< 100 s
Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefahr) (300 nm – 700 nm)	> 10.000 s	10.000 s ... 100 s	100 s ... 0,25 s	< 0,25 s
Thermische Netzhautgefahr (380 nm – 1400 nm)	> 10 s	> 10 s	10 s ... 0,25 s	< 0,25 s
Infrarot- Strahlungsgefahr (780 nm – 1400 nm)	> 1.000 s	1.000 s ... 100 s	100 s ... 10 s	< 10 s

Bei dem aufgebauten Laserscanner wird die gesamte Strahlung im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 780 nm emittiert, so dass für die photobiologische Sicherheit die thermische Netzhautgefahr und die photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefahr) betrachtet und näher analysiert werden müssen. Der Bereich der aktinischen und der nahen UV-Gefahr endet bei einer Obergrenze von 400 nm während die im Aufbau vorgesehene Diode mit der geringsten

Wellenlänge blaues Licht emittiert und bei 450 nm liegt. Eine Untersuchung für diese beiden Bereiche ist dementsprechend nicht notwendig.

5.9.2 Berechnung für den Prototypenaufbau

Gefahren hinsichtlich der Sicherheit und Gesundheit von Arbeitnehmern vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung werden in der Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments vom 5. April 2006 bewertet.

Die dort vorgenommene Betrachtung richtet sich nach der Strahlungsleistung bezogen auf die bestrahlte Fläche. Über die nachfolgenden Gleichungen lassen sich die Expositionswerte bestimmen, anhand derer die biophysikalischen Risiken ermittelt werden können. In der Richtlinie sind dazu Grenzwerte der Leistungsdichte entsprechend der Expositionsdauer definiert.

$$E = \frac{dP}{dA} \quad (5.12)$$

$$H = \int_0^t E(t) dt \quad (5.13)$$

mit:

P Leistung in Watt

A Bestrahlte Fläche in m^2

$E(t)$, E Bestrahlungsstärke/ Leistungsdichte (Strahlungsleistung nach Fläche) in W/m^2

H Bestrahlung (Integral der Bestrahlungsstärke über der Zeit) in J/m^2

t Expositionsdauer in Sekunden

Neben der Leistungsdichte, der Expositionsdauer und den verwendeten Wellenlängenbereichen ist außerdem das betroffene Organ relevant. Es wird hier zwischen Haut und Auge unterschieden, das Auge bedingt jedoch deutlich geringere Grenzwerte, so dass es für die gesamte photobiologische Sicherheit ausreichend ist, die Augensicherheit zu berücksichtigen.

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Laser emittieren im Bereich zwischen 400 nm und 700 nm und dürfen damit gemäß der Richtlinie eine Leistungsdichte von $10 W/m^2$ nicht überschreiten. Diesem Wert liegt die Annahme einer Bestrahlungsdauer über 10s zugrunde, da

bei geringeren Zeiten höhere Werte zugelassen sind. Weiterhin werden wellenlängenabhängige Korrekturfaktoren vernachlässigt, da diese zu einer Erhöhung des erlaubten Werts führen und für die überschlägige Betrachtung in diesem Fall nicht notwendig sind.

Die eingesetzten Laserdioden sind in Abschnitt 5.5 beschrieben und verfügen über eine theoretische Maximalleistung von 2,25 W. Für den Fall, dass diese gesamte optische Leistung anliegt und keine Verluste durch optische Elemente entstehen, liegt nach Gleichung 5.12 bei homogener Verteilung der Leistung eine Gefahr für die Augen ab einer Projektionsfläche von weniger als $0,225 \text{ m}^2$ vor. Im realen System ist jedoch eher von einem optischen Wirkungsgrad unter 50 % auszugehen, wie im nachfolgenden Kapitel in Abschnitt 6.1 näher ausgeführt wird, so dass sich die Fläche auf etwa $0,1125 \text{ m}^2$ halbiert.

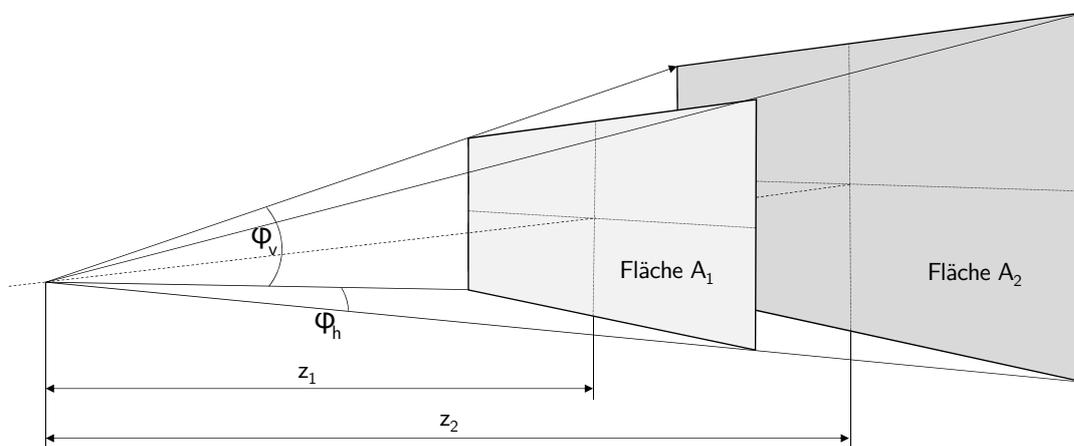


Abbildung 5.18: Flächen und Längen zur Lasersicherheit

Nach den in Abbildung 5.18 dargestellten Zusammenhängen kann berechnet werden, in welchem Abstand z_1 vor der Projektionseinheit ein Bild mit der entsprechenden Fläche A_1 senkrecht zur optischen Achse aufgespannt wird. Befindet sich ein Betrachter weiter entfernt, so sinkt die Leistungsdichte und das System kann als ungefährlich betrachtet werden.

Um diese theoretischen Flächen mit den in Abschnitt 3.2 aufgeführten Projektionsgrößen zu vergleichen, muss auf eine Projektionsfläche im Raum zurückgerechnet werden, wie sie in Abbildung 5.18 dargestellt ist. Die Öffnungswinkel des Systems sind in Abschnitt 3.2.1 hergeleitet und betragen für die maximale Projektionsfläche von 20 m^2 auf der Straße horizontal $\varphi_h = 11,42^\circ$ sowie vertikal $\varphi_v = 6,77^\circ$.

Für eine Fläche A mit den dazugehörigen Kantenlängen x_A in horizontaler sowie y_A in vertikaler Richtung lässt sich der Abstand z zur Fläche nach den folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\tan \frac{\varphi_h}{2} = \frac{x_A/2}{z} \quad (5.14)$$

$$\tan \frac{\varphi_v}{2} = \frac{y_A/2}{z} \quad (5.15)$$

$$x \cdot y = 4 \cdot z^2 \cdot \tan \frac{\varphi_h}{2} \cdot \tan \frac{\varphi_v}{2} \quad (5.16)$$

$$\Rightarrow z = \sqrt{\frac{x_A \cdot y_A}{4 \cdot \tan \frac{\varphi_h}{2} \cdot \tan \frac{\varphi_v}{2}}} \quad (5.17)$$

Mit der zuvor ermittelten Fläche von $A = 0,1125 \text{ m}^2$ führt dies zu einem Abstand von $z \leq 2,2 \text{ m}$, der unterschritten werden muss um eine Gefahr darzustellen. Selbst für den Fall, dass keine Verluste im optischen System auftreten, liegt die für die Augen gefährliche Distanz bei $z \leq 3,1 \text{ m}$ vor dem Lichtaustritt.

Sofern der Mikrospiegel also den maximal geforderten Darstellungsbereich ausleuchtet, ist der Bereich von 0 bis 2,2 m vor dem Fahrzeug hinsichtlich der Augensicherheit gefährlich. Sofern das Fahrzeug nicht steht, ist nicht davon auszugehen, dass sich Personen oder Tiere im Bereich bis 2 m auf Scheinwerferhöhe vor dem Fahrzeug befinden. Sollte dies dennoch der Fall sein, ist von einer größeren Gefährdung durch das fahrende Fahrzeug auszugehen als durch die Laserstrahlung.

Für den Fall, dass ein anderer Winkelbereich gewählt wird, muss die Berechnung mit den entsprechenden Winkeln erneut durchgeführt werden. Als kleinste Projektionsgröße wird in Abschnitt 3.2 eine Fläche von 1 m^2 aufgeführt, was abhängig von der Form der Projektion beispielsweise zu $\varphi_h = 10,4^\circ$ und $\varphi_v = 1,67^\circ$ führt. Daraus ergibt sich eine Distanz von $z \leq 29,1 \text{ m}$ vor dem Lichtaustritt, in der die erzeugte Projektion bei Bestrahlung über mehr als 10 s eine Gefahr für die Netzhaut darstellt. Da die Projektion bereits im Abstand von 5 m vor dem Fahrzeug beginnt, ist eine Gefährdung bei üblichem Straßenbelag mit dem in Abschnitt 3.2.2 verwendeten Reflexionsgrad von $\rho = 0,07$ dennoch zu vernachlässigen. Da jedoch reflektierende Elemente wie etwa Pfützen oder Ähnliches im Strahlengang vorhanden sein können, ist eine zusätzliche Betrachtung notwendig.

Hierzu müssen verschiedene Szenarien untersucht werden:

1. Person/ Tier befindet sich vor dem Fahrzeug und Abstand zur Projektionseinheit ist größer als 29,1 m
2. Person/ Tier befindet sich vor dem Fahrzeug und Abstand zur Projektionseinheit ist kleiner als 29,1 m
3. Person/ Tier befindet sich seitlich vom Fahrzeug und Abstand zur Projektionseinheit ist größer als 29,1 m
4. Person/ Tier befindet sich seitlich vom Fahrzeug und Abstand zur Projektionseinheit ist kleiner als 29,1 m

Für die Fälle 1 und 3 sind keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich, da hier aufgrund der großen Entfernung keine Gefahr besteht. Von einer Gefährdung ist erst auszugehen, wenn sich die Person oder das Tier so weit dem Fahrzeug nähert, dass der Abstand weniger als 29,1 m beträgt und damit Fall 2 oder 4 eintritt.

Szenario 2 könnte beispielsweise durch ein vorausfahrendes Fahrzeug gegeben sein. Um eine solche Gefahr zu vermeiden, muss eine Abstandsmessung vorausfahrender Fahrzeuge durchgeführt werden. Da für die angestrebte Funktion des Systems eine freie Projektionsfläche erforderlich ist und diese beispielsweise über die Fahrzeugkamera bestimmt wird, können auch diese Daten für die aktive Verhinderung einer Gefährdung genutzt werden. Für den Fall, dass eine Person oder ein Tier im Abstand von weniger als 29,1 m vor dem Fahrzeug steht, muss betrachtet werden, ob der Fahrer noch in der Lage wäre zu bremsen. Ist dies nicht der Fall, ist davon auszugehen, dass ein Zusammenstoß mit dem Fahrzeug größere Schäden verursacht als der eventuell noch angeschaltete Laser. Zur Berechnung der Fahrzeuggeschwindigkeit, die zu einem Bremsweg von 29,1 m führt, wird die nachfolgende Formel verwendet:

$$v = \sqrt{(a \cdot t_R)^2 + 2 \cdot a \cdot z} - a \cdot t_R. \quad (5.18)$$

Die dabei angenommenen Werte sind eine Reaktionszeit von $t_R = 0,8$ s und eine Bremsverzögerung von $a = 8 \text{ m/s}^2$, was in etwa der Verzögerung bei einer Gefahrenbremsung auf trockener Fahrbahn entspricht. Die Größe z bezeichnet hier den Bremsweg, so dass für den betrachteten Fall eine Geschwindigkeit von $v = 15,33 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ überschritten sein muss, um ein rechtzeitiges Anhalten zu verhindern. Fährt das Fahrzeug schneller als diese Geschwindigkeit, so ist die Gefährdung durch den Laser vernachlässigbar. Wird also mit einem Sicherheitsfaktor von etwa

zwei eine Mindestgeschwindigkeit von $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ für das Anschalten der Projektion vorausgesetzt, so kann eine photobiologische Gefährdung auch bei der kleinsten Projektionsgröße von 1 m^2 ausgeschlossen werden.

Für seitlich vom Fahrzeug stehende Personen oder Tiere (Fall 4) kann zunächst davon ausgegangen werden, dass keine Gefahr durch den nach vorne ausgerichteten Laserstrahl ausgeht. Befindet sich jedoch ein reflektierendes Objekt im Strahlengang, kann eine Gefährdung durch den abgelenkten Strahl auch seitlich des Projektionsraums entstehen. Wenn durch eine entsprechende Verknüpfung mit den Fahrzeugsignalen davon ausgegangen werden kann, dass das Projektionsmodul in Bewegung ist und die zuvor bestimmte Mindestgeschwindigkeit einhält, so ist die Gefahr für Personen oder Tiere abseits des Fahrwegs allerdings vernachlässigbar. Durch die Bewegung des Fahrzeugs ist die maximale Verweildauer des Laserstrahls auf dem Auge des Betrachters so gering, dass keine Schädigung zu erwarten ist. Lediglich der Fall eines seitlich fahrenden Fahrzeugs muss erfasst und gegebenenfalls analog zu den Betrachtungen von Fall 2 berücksichtigt werden.

6 Validierung des Prototyps

Der in Kapitel 5 erarbeitete Aufbau wird mit den beschriebenen Komponenten umgesetzt und aufgebaut. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 6.1 mit zusätzlich eingezeichneten Strahlengängen für die einzelnen Laser zu sehen.

Der dargestellte Demonstratoraufbau verfügt über die Möglichkeit, die drei Laserdioden je mit bis zu 10 MHz zu schalten und so in Kombination mit dem Mikrospiegel Bilder zu erzeugen. Anhand dieses Aufbaus werden nun Versuche zur Validierung der Anforderungen und zur Bestimmung der Systemeigenschaften durchgeführt.

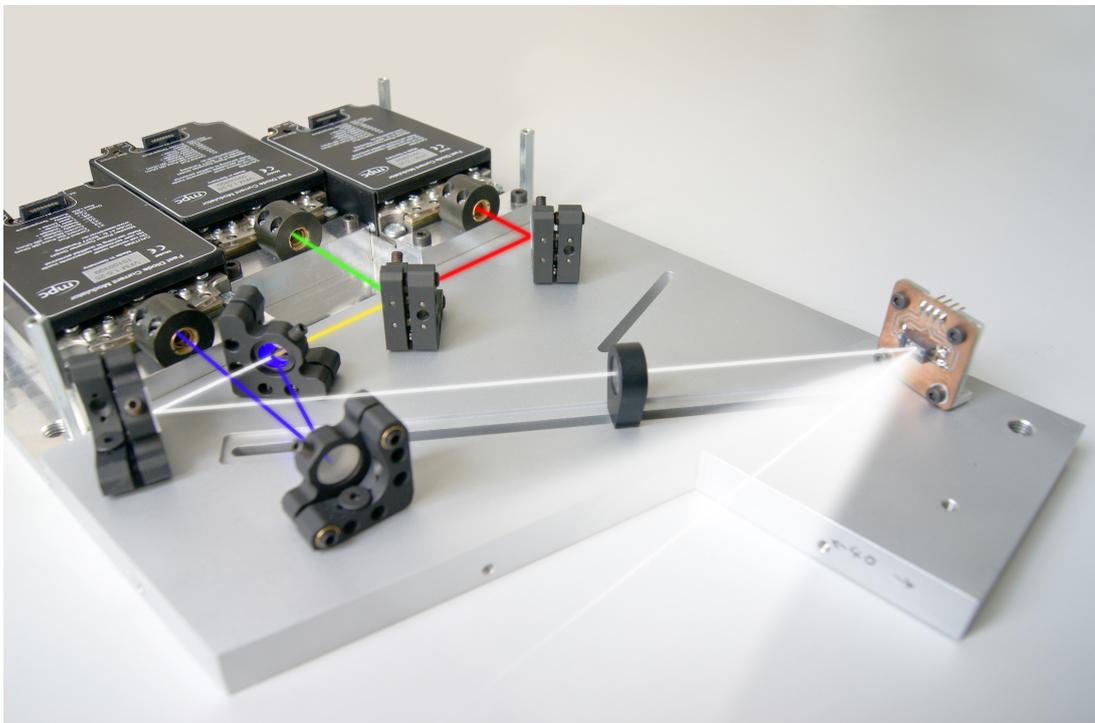


Abbildung 6.1: Prototyp des RGB-Laserscanners mit Darstellung der Pfade für die jeweiligen Laserstrahlen

Zunächst wird jede der Laserquellen hinsichtlich ihrer Abstrahlleistung und -charakteristik untersucht. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf Bildqualität, (Laser-)Punktgröße und Kontrast

des Systems ziehen. In Kombination mit der Untersuchung der weiteren optischen Elemente (dichroitische Spiegel, Breitbandspiegel, Linsen und Mikrospiegel) lassen sich Aussagen über die Systemeffizienz treffen und die Qualität der in der Simulation getroffenen Annahmen überprüfen und optimieren. Weiterhin werden thermische Einflüsse auf das System untersucht und bewertet. Zur Einordnung der darstellbaren Bildpunkte erfolgt eine Betrachtung der Laseransteuerung hinsichtlich ihres zeitlichen Verhaltens.

6.1 Effizienz des optischen Systems

Die Leistungs- und Wirkungsgradkette von der Eingangsleistung bis zum erzeugten Bild ist in Abbildung 6.2 für ein halbleiterbasiertes optisches System dargestellt. Bei dem vorgestellten RGB-Laserscanner lassen sich die Einflussfaktoren auf den Systemwirkungsgrad wie in Abbildung 6.3 aufteilen.

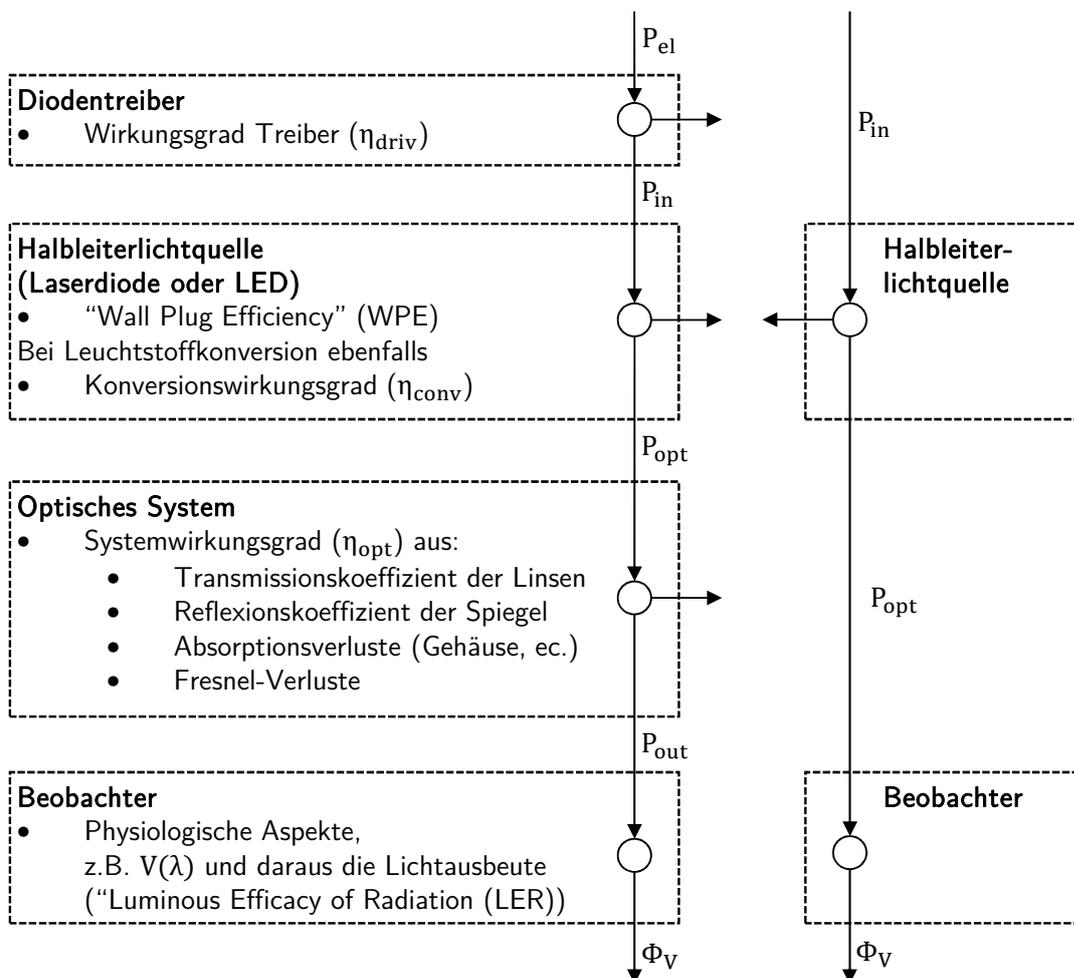


Abbildung 6.2: Effizienz eines Halbleiterlichtsystems nach [KLOP16b]

Der an die Energiequelle angeschlossene Diodentreiber erzeugt entweder einen konstanten Strom für die Halbleiterlichtquelle oder sorgt für eine modulierte Ansteuerung, beispielsweise als PWM-Signal. Typische Werte für den Treiberwirkungsgrad η_{driv} sind 80 – 90 % [LACH14c]. Daran angeschlossen ist die Lichtquelle, deren Wirkungsgrad auch oft mit dem englischen Begriff *Wall-Plug-Efficiency* (WPE) bezeichnet wird. Es handelt sich dabei um das Verhältnis elektrisch aufgenommener Leistung P_{el} zu abgegebener optischer Leistung P_{opt} [BASU13a]. Im Fall von Beleuchtungsaufgaben wird oft von der Lichtausbeute gesprochen [MESC10]. Dazu wird der emittierte Lichtstrom Φ_v , der mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet ist, mit der elektrischen Leistung in Beziehung gesetzt. Die dazugehörige Einheit ist lm/W. Im Fall von Laserquellen mit ihrer sehr begrenzten Emissionswellenlänge ist es sinnvoller, die radiometrischen Größen und in diesem Fall die optische Ausgangsleistung Φ_e zu betrachten. Die Bewertung in Bezug auf das menschliche Sehen kann mit Erzeugung des Bildes erfolgen. In Abbildung 6.2 ist dies mit dem Beobachter als letztes Element berücksichtigt.

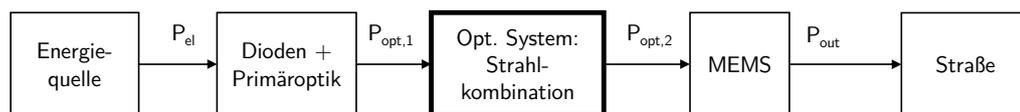


Abbildung 6.3: Wirkungskradkette des Systems

Der Wirkungsgrad von Halbleiterlichtquellen ist abhängig von der Quantenausbeute des Halbleiterchips und der Auskoppel-effizienz aus dem Chip [SCHU06]. Die beiden Faktoren sind von der Materialwahl und Herstellung der Dioden abhängig und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter differenziert. Der Wirkungsgrad von aktuell verfügbaren Laserdioden für blaues Licht liegt bei etwa 25 % [BASU13a], für Lichtquellen, die ihre Farbe mit einem Konvertermaterial erzeugen, also beispielsweise ein Großteil der weißen LEDs, kommt dessen Wirkungsgrad zur Betrachtung hinzu. In Abbildung 6.3 ist er mit η_{conv} bezeichnet. Auch die Lichterzeugung in der Konversionsschicht ist stark von der eingestrahelten Wellenlänge und Energie abhängig [WOLF17]. Außerdem gilt auch hier eine starke Temperaturabhängigkeit der Effizienz.

Weitere Einflussfaktoren auf die Effizienz des Gesamtsystems sind Reflexions- und Transmissionsgrad der einzelnen optischen Elemente. Für einen beschichteten Aluminiumspiegel kann dieser mit 91,5 % angenommen werden, bei der Wahl geeigneter Beschichtungen auch über 99 % betragen [NAUM92]. Im Allgemeinen kann für jede unbeschichtete optische Fläche materialabhängig ein Verlust von etwa 4 % angenommen werden. Dieser Verlust steigt noch zusätzlich,

wenn der Winkel des einfallenden Lichts zur optischen Fläche stark von 90° abweicht. Somit ergibt sich für eine unbeschichtete Glaslinse ein Transmissionsgrad von etwa 92 %. [NAUM92]

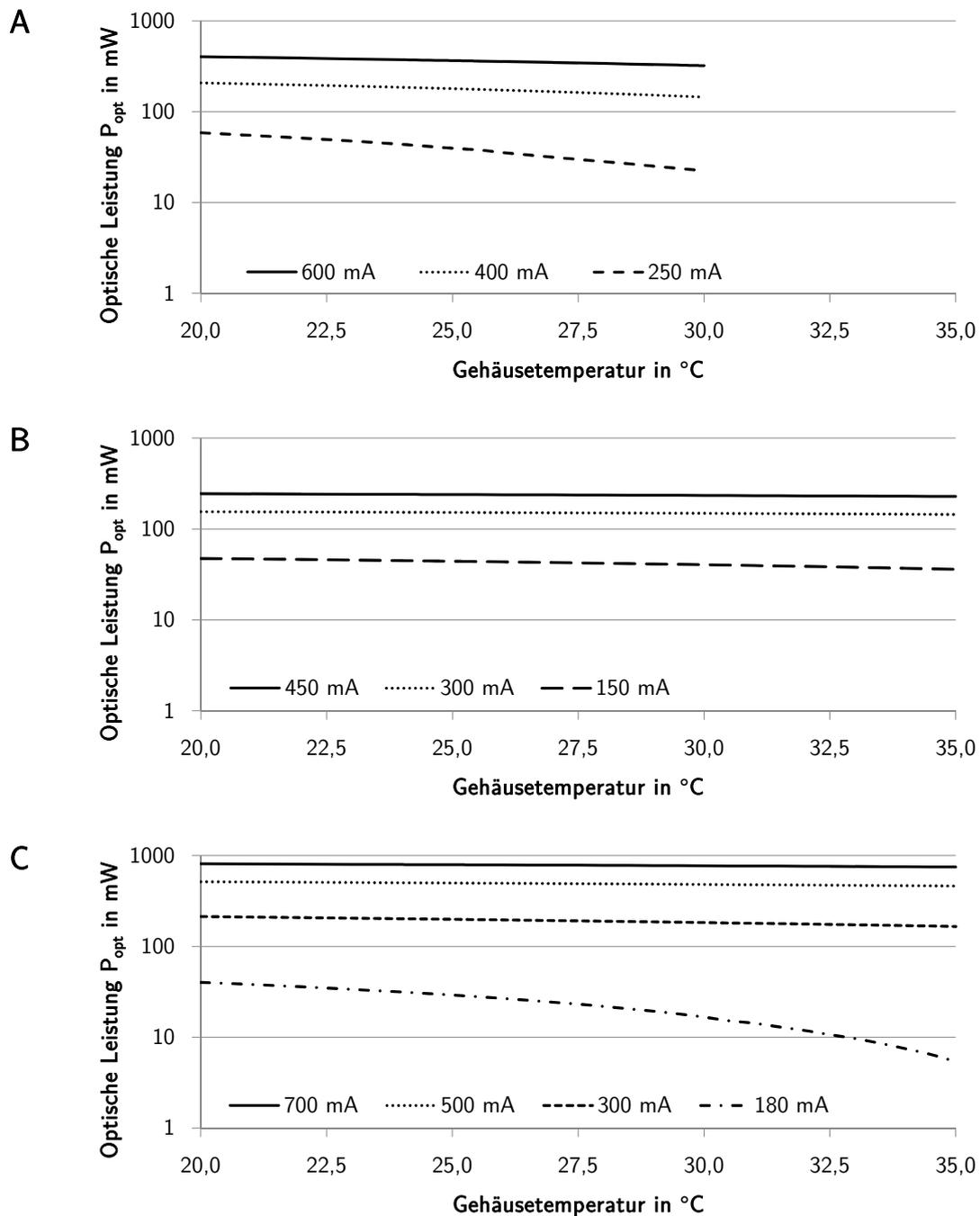


Abbildung 6.4: Temperaturabhängigkeit der Diodenleistung im Demonstratoraufbau

A: Rote Diode (ADL63v0-BTP)

B: Grüne Diode (PLP520)

C: Blaue Diode (PL-TB450B)

Für die Betrachtung der Systemeffizienz des aufgebauten Demonstrators wird der in Abbildung 5.10 dargestellte optische Aufbau untersucht. Die Laserleistungen werden mit einem

Laserleistungsmesskopf wie in Abschnitt 5.6 bestimmt, hier allerdings im Prototyp verbaut. Aufgrund der starken thermischen Abhängigkeit der emittierten Laserleistung wird für den Versuchsaufbau außerdem eine Leistungsmessung bei verschiedenen Betriebszuständen durchgeführt und in Abbildung 6.4 dargestellt. Für die rot emittierende Diode aus Abbildung 6.4-A sind nur Werte bis zu einer Gehäusetemperatur von 30 °C aufgeführt, da höhere Temperaturen zu einer Schädigung der Diode führen und die Emissionsleistung dauerhaft verringern. Bedingt durch die große Strahldivergenz der Laserdioden ist außerdem eine Messung zwischen Diode und Primäroptik nicht sinnvoll möglich. Die Messwerte für den Laser beziehen sich folglich immer auf die Emission nach der Primäroptik.

Zur Bestimmung der Effizienz des Gesamtaufbaus werden die Dioden bei den im Datenblatt angegebenen Betriebspunkten angesteuert und die Laserleistung nach dem Mikrospiegel gemessen. Der Gesamtwirkungsgrad beinhaltet somit die einzelnen Wirkungsgrade jedes Elements von der Stromquelle bis zur Bilderzeugung:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Ansteuerung}} \cdot \eta_{\text{Diode}} \cdot \eta_{\text{Optik}} \cdot \eta_{\text{MEMS}}. \quad (6.1)$$

Die dazugehörigen Messergebnisse für die einzelnen Dioden und auch für das Gesamtsystem sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Laserleistungsmessung am Gesamtaufbau mit Maximalstrom an den Dioden

	Laser rot	Laser grün	Laser blau	Gesamt
Betriebsstrom	700 mA	480 mA	1200 mA	—
Optische Leistung P_{out}	133 mW	96 mW	693 mW	922 mW
Elektrische Leistung	1,69 W	3,13 W	5,54 W	10,36 W
Wirkungsgrad η_{ges}	0,08	0,03	0,13	0,09

Für die Charakterisierung des Systems ist es neben den schon aufgeführten Wirkungsgraden der Dioden außerdem wichtig, die Effizienz des optischen Systems zu betrachten. Die relevanten Elemente sind in Abbildung 6.3 aufgeführt und für einen ausgewählten Farbzustand werden die einzelnen Wirkungsgrade beispielhaft bestimmt. Mit der Aufnahme der Laserleistung nach der Primäroptik steht für jede Laserdiode ein Ausgangswert $P_{\text{opt},1}$ zur Verfügung. Anschließend werden die Messungen nach der Strahlkombination wiederholt, was zur Leistung $P_{\text{opt},2}$ führt, und dann schließlich auch P_{out} nach dem Mikrospiegel.

Zur Bestimmung der Verluste von Strahlkombination und Mikrospiegel werden die Laserleistungen vor und nach den jeweiligen Elementen für den ausgewählten Farbzustand verglichen. Die Laserleistungen werden dazu für jede Diode einzeln und auch für das gemischte Licht gemessen, um so den Wirkungsgrad zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2: Wirkungsgrade im optischen System des Versuchsaufbaus

	Laser rot	Laser grün	Laser blau	Gesamt
Leistung vor Strahlkombination $P_{\text{opt},1}$	320 mW	130 mW	220 mW	670 mW
Leistung vor Mikrospiegel $P_{\text{opt},2}$	112 mW	67 mW	110 mW	289 mW
Leistung nach Mikrospiegel P_{out}	81,5 mW	51,5 mW	75 mW	208 mW
Wirkungsgrad Strahlkombination η_{Optik}	0,35	0,52	0,50	0,43
Wirkungsgrad MEMS η_{MEMS}	0,73	0,77	0,68	0,72
Wirkungsgrad opt. System $\eta_{\text{Optik}} \cdot \eta_{\text{MEMS}}$	0,25	0,40	0,34	0,31

6.2 Lichtstrom und Beleuchtungsstärke

Unter der Annahme, dass Laserdioden die gesamte abgegebene Leistung in einer einzigen Wellenlänge emittieren und eine Mischung des Lichts aus roten, grünen und blauen Dioden verwendet wird, kann der resultierende Lichtstrom des Laserscanners wie in Gleichung 6.2 aufgeführt aus Gleichung 2.3 bestimmt werden. Dabei werden die drei Produkte der jeweiligen Strahlungsleistung mit dem entsprechenden Wert der Hellempfindlichkeitskurve aufsummiert, was anhand der folgenden Gleichung erfolgt:

$$\Phi_{V,\text{Scanner}} = K_m \cdot \left(V(\lambda_{\text{rot}}) \cdot \Phi_{e,\text{rot}} + V(\lambda_{\text{grün}}) \cdot \Phi_{e,\text{grün}} + V(\lambda_{\text{blau}}) \cdot \Phi_{e,\text{blau}} \right). \quad (6.2)$$

Die dazu verwendeten Größen sind das photometrische Strahlungsäquivalent $K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$, die Helligkeitsempfindlichkeitskurve des Auges für Tagsehen $V(\lambda)$ mit der dominanten Wellenlänge λ der jeweiligen Laserdiode sowie deren Strahlungsleistung Φ_e .

So ergibt sich beispielsweise mit einer Kombination von einer roten Diode bei $\lambda_{\text{rot}} = 638 \text{ nm}$ und einer Strahlungsleistung von $\Phi_{e,\text{rot}} = 500 \text{ mW}$, einer grünen Diode bei $\lambda_{\text{grün}} = 520 \text{ nm}$

mit $\Phi_{e,grün} = 150 \text{ mW}$ und einer blauen Diode bei $\lambda_{blau} = 450 \text{ nm}$ mit $\Phi_{e,blau} = 1.600 \text{ mW}$ der folgende Lichtstrom:

$$\Phi_{V,Scanner,max} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot (0,038 \cdot 0,5 \text{ W} + 0,71 \cdot 0,15 \text{ W} + 0,217 \cdot 1,6 \text{ W}) = 323 \text{ lm} \quad (6.3)$$

Bei den gewählten Emissionsleistungen für die drei Farben handelt es sich um die Angaben der Betriebspunkte in den Datenblättern der drei verwendeten Dioden, so dass das Ergebnis ein theoretisch maximaler Lichtstrom des Aufbaus vor der Strahlkombination ist, der aber im tatsächlichen Betrieb nur selten eingesetzt werden dürfte.

Zur Bestimmung der Mischverhältnisse der Farben für die erzeugte Farbe, werden die von den einzelnen Dioden erzeugten Lichtströme auf den Gesamtlichtstrom bezogen, wie in den nachfolgenden Gleichungen aufgeführt:

$$R = \frac{\Phi_{e,rot}}{\Phi_{e,rot} + \Phi_{e,grün} + \Phi_{e,blau}} \quad (6.4)$$

$$G = \frac{\Phi_{e,grün}}{\Phi_{e,rot} + \Phi_{e,grün} + \Phi_{e,blau}} \quad (6.5)$$

$$B = \frac{\Phi_{e,blau}}{\Phi_{e,rot} + \Phi_{e,grün} + \Phi_{e,blau}} \quad (6.6)$$

Für die Darstellung von Symbolen sollen im Scanner hauptsächlich die ungemischten roten, grünen und blauen Laserdioden sowie ein gemischtes Weiß verwendet werden. Für die nachfolgenden Berechnungen werden jeweils 5.000 K bis 6.000 K als Farbtemperatur für die weitere Auslegung betrachtet. Es handelt sich dabei um typische Werte für weiße LEDs und somit können weiße, rote, grüne und blaue Projektionen ohne Intensitätsanpassung der Dioden direkt erzeugt werden. Die Aufteilung der Farbanteile nach den zuvor aufgeführten Gleichungen ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass für die Darstellung der angestrebten weißen Punkte ein großer Anteil roter Strahlung insbesondere im Vergleich zur blauen bereitgestellt werden muss.

Für die beiden Zielfarben mit einer Farbtemperatur von 5.000 K und 6.000 K sind die CIE-Koordinaten und die erforderlichen Laserleistungen in Tabelle 6.4 aufgeführt. Die Werte basieren auf den zuvor berechneten Anteilen, wobei als begrenzende Größe 120 mW Maximalleistung der grünen Diode angenommen wird. Die Werte für die Maximalleistung sind theoretische Annahmen, die auf den Herstellerangaben der Dioden basieren und hier für die Bestimmung

Tabelle 6.3: Farbanteile für Weiß

	Farbtemperatur	
	5.000 K	6.000 K
Rotanteil	51,4 %	47,9 %
Grünanteil	33,3 %	33,4 %
Blauanteil	15,3 %	18,7 %

der Lichtfarbe und des Lichtstroms gut eingesetzt werden können. Aus den entsprechenden Laserleistungen wird dann mit den zuvor aufgeführten Formeln und unter der Annahme schmalbandiger Emission der Lichtstrom für die Farbpunkte berechnet.

Tabelle 6.4: Berechnete Farbwerte für Weißdarstellung

	Weiß		
	5.000 K	6.000 K	Maximalleistung
CIE-Koordinate x	0,35	0,32	0,21
CIE-Koordinate y	0,35	0,33	0,06
Farbtemperatur	4995 K	5962 K	/
Laserleistung rot	185 mW	172 mW	500 mW
Laserleistung grün	120 mW	120 mW	120 mW
Laserleistung blau	55 mW	67 mW	1.600 mW
Laserleistung gesamt	360 mW	359 mW	2.220 mW
Lichtstrom	71 lm	73 lm	172 lm

Nach den in Abschnitt 2.1 aufgeführten Grundlagen lässt sich die Beleuchtungsstärke I über den Lichtstrom und die beleuchtete Fläche berechnen. Für die Annahme einer Symbolprojektion auf einer Fläche von 5 m^2 muss nach Tabelle 3.1 in Abschnitt 3.2.2 ein Lichtstrom von 5 lm vorliegen, um bei Dunkelheit mit Straßenbeleuchtung erkennbar zu sein. Für die maximal vorgesehene Projektionsfläche von 20 m^2 werden 20 lm benötigt. Das aufgebaute System verfügt nach den Ergebnissen aus Abschnitt 6.1 über einen maximalen Lichtstrom von 153 lm und für den in der Projektion eingesetzten Farbort einen Wert von 38 lm (nach Tabelle 6.1). Damit ist die angestrebte Darstellung bei Dunkelheit mit Scheinwerferlicht und Straßenbeleuchtung für alle Projektionsflächen möglich, bei Verringerung der projizierten Symbolgröße auf 5 m^2 kön-

nen sogar bei beginnender Dämmerung und 750 lx Beleuchtungsstärke der Umgebung noch sichtbare Informationen erzeugt werden.

6.3 RGB-Strahlkombination und Spotgeometrie

Die Überlagerung der einzelnen Laserstrahlen erfolgt wie in Abschnitt 5.5 beschrieben über dichroitische Spiegel in Kombination mit Linsen zur Strahlformung. Mit dem in Abbildung 6.5 dargestellten Versuchsaufbau wird die Strahlgeometrie der jeweiligen Laser mithilfe eines Strahlprofilmessgeräts bestimmt.

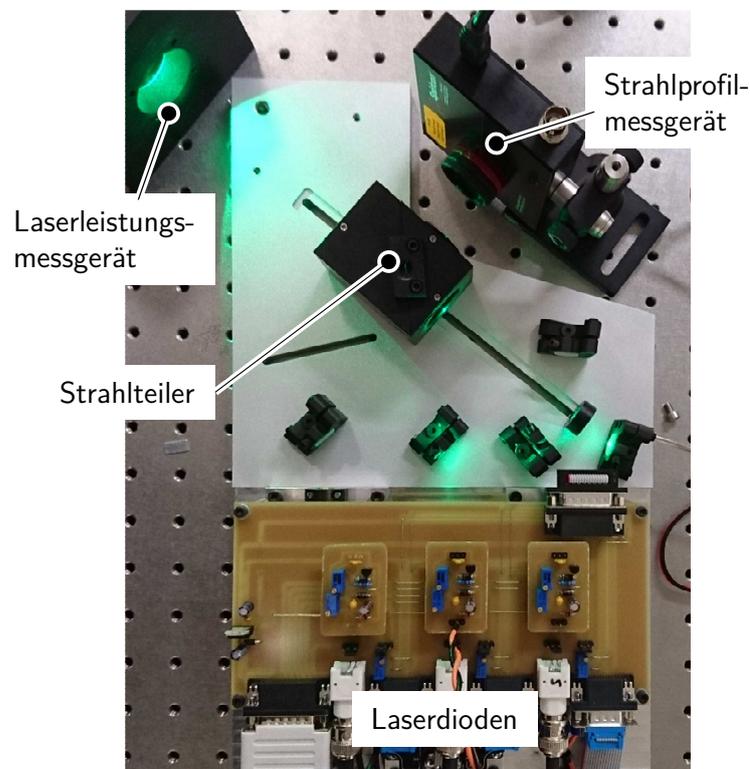


Abbildung 6.5: Prototyp und Messaufbau zur Bestimmung von Laserleistung und Laserstrahlprofilen nach [KLOP16a]

So kann die Spotgeometrie der Laser bestimmt und die Qualität der Überlagerung bewertet werden. Der Strahlteiler im System lenkt 5 % der Strahlung im sichtbaren Bereich auf das Strahlprofilmessgerät, während 95 % ein Laserleistungsmessgerät erreichen. Die Messergebnisse des Strahlprofilmessgeräts, das im gleichen Abstand von den Dioden aufgebaut ist, wie der Mikrospiegel im Aufbau, sind in Abbildung 6.6 dargestellt und tabellarisch im Anhang in Tabelle A.6 aufgeführt. Die Größe der einzelnen dargestellten Kästen ist jeweils 1 mm x 1 mm,

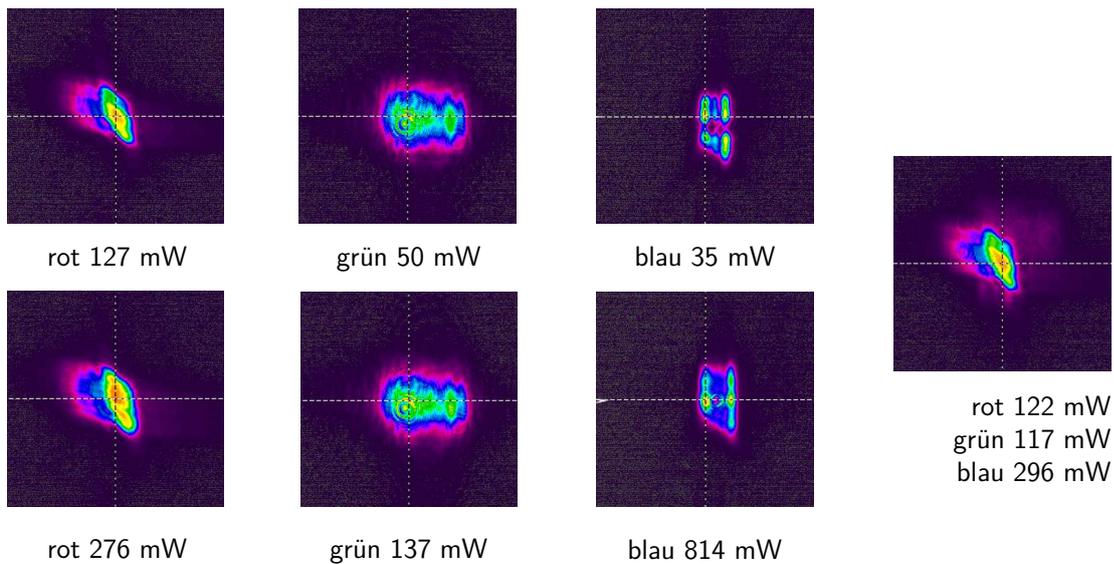


Abbildung 6.6: Leistungsabhängige Strahlprofile auf einer 1 mm x 1 mm Fläche für die Laser einzeln und als Strahlkombination nach [KLOP16a]

so dass die Größen der Laserpunkte vergleichbar sind und außerdem etwa die Spiegelfläche des Mikrospiegels darstellen. Abgebildet sind die Intensitätsverteilungen der Laserstrahlen für jede Farbe einzeln bei je zwei verschiedenen Leistungsstufen und einmal ein kombinierter Strahl.

Zur Reduzierung der Gesamtzahl der Teile sowie aufgrund der Größe der Lasertreiber sind die Weglängen der einzelnen Strahlen nicht ganz exakt einzuhalten, wie zuvor simuliert. Die Weglängenunterschiede in Kombination mit der unterschiedlichen Abstrahlcharakteristik der einzelnen Laserdioden führen zu verschiedenen Strahlprofilen. Das kombinierte Bild in der vierten Spalte zeigt allerdings, dass der überlagerte Strahl in Summe wenig Streuung aufweist. Ein Foto des Laserpunkts auf einer 5 m entfernten Wand ist in Abbildung 6.7 zu sehen.



Abbildung 6.7: Foto des kombinierten Laserspots auf weißer Wand [ROTH14]

Auf dem Foto sind deutlich Elemente der verschiedenfarbigen Laserquellen zu erkennen. Dies ist allerdings nur bei völliger Dunkelheit der Umgebung der Fall. Bereits bei geringer Beleuchtung ist nur noch der zentrale Laserpunkt zu sehen. Weiterhin führt der scannende Einsatz des Laserstrahls zu einer Vergleichmäßigung der Darstellung, so dass das erzeugte Bild homogener aussieht als der einzelne Bildpunkt. Kohärenzeffekte wie Laserspeckles lassen sich bei dem einzeln dargestellten Bildpunkt erkennen, sind im gescannt erzeugten Bild allerdings nicht vorhanden, so dass keine zusätzlichen Maßnahmen zur Specklezerstörung erforderlich sind.

6.4 Farbmischung

Die in Abbildung 6.4 abgebildete Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung der Laserdioden von der anliegenden Temperatur spielt ebenfalls bei der erzeugten Lichtfarbe eine große Rolle. Findet bei einer Temperaturerhöhung am Diodengehäuse keine Anpassung des Stroms statt, so reduziert sich die abgegebene Laserleistung wie in Abbildung 6.4 dargestellt. Als Folge

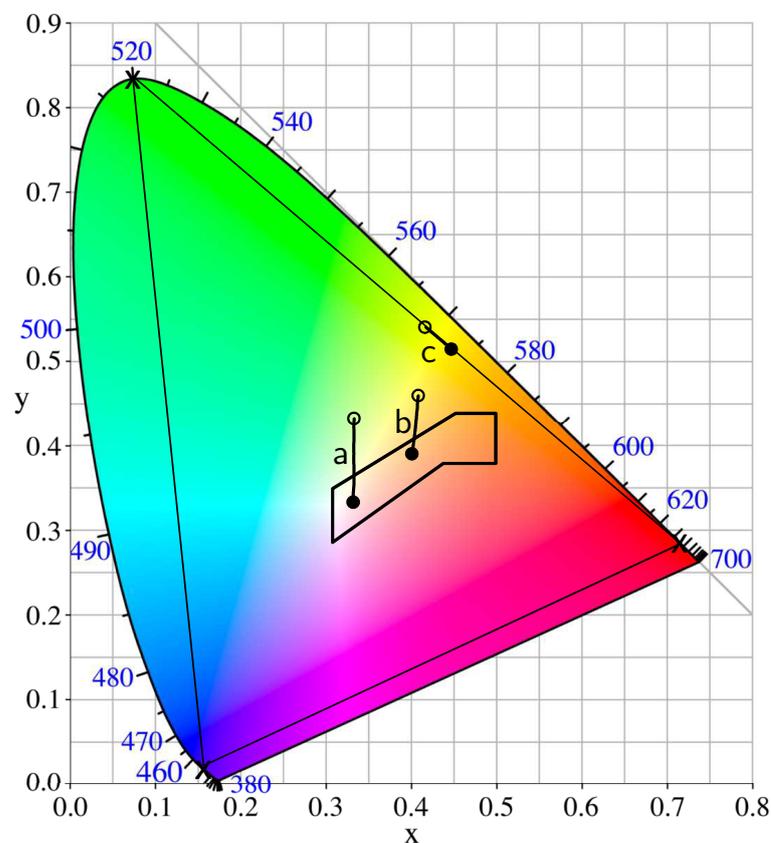


Abbildung 6.8: Veränderung des Farborts von ausgefüllten zu leeren Kreisen bei Temperaturerhöhung um $\Delta T_{\text{case}} = 10 \text{ K}$ [KLOP16a]

davon ändern sich die prozentualen Farbanteile in der Mischung und die resultierende Farbe weicht von der ursprünglich erzeugten ab. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 6.8 drei beispielhafte Farborte im CIE-Farbdiagramm dargestellt. Die ausgefüllten Kreise stellen die jeweilige Ausgangsfarbe bei 20 °C dar. Es handelt sich um zwei verschiedene Ausprägungen eines ECE-konformen Weißtones. Der dritte Punkt ist eine Mischung aus der roten und der grünen Diode.

Eine Erhöhung der Temperatur um $\Delta T_{\text{case}} = 10 \text{ K}$ führt zu den Farborten, die mit einem leeren Kreis gekennzeichnet sind. So wird deutlich, dass bereits geringe Temperaturunterschiede eine große Auswirkung auf die erzeugte Farbe haben. Im automobilen Umfeld müssen die Bauteile für deutlich größere Temperatursprünge unempfindlich sein. Soll eine bestimmte Farbe gehalten werden, beispielsweise um ein ECE-konformes Weiß zu erzeugen, so muss eine Regelung über den Diodenstrom vorgenommen werden.

Die blaue Diode wurde in den vorangegangenen Betrachtungen aufgrund der ermittelten Farbanteile mit einem Betriebsstrom von etwa 300 – 400 mA nah an der Laserschwelle betrieben und zeigt entsprechend Abbildung 6.4-C große Abhängigkeiten der optischen Strahlungsleistung von der Gehäusetemperatur. Die betrachteten Farbpunkte in Abbildung 6.8 beinhalten deshalb mit dem Punkt (c) auch einen Farbort ohne Blauanteil. Wie zu erkennen ist, liegt dort dann auch eine geringere Verschiebung des Farborts durch thermische Einflüsse vor. Sollen die anderen beiden Dioden und auch das Farbmischverhältnis beibehalten werden, kann eine blaue Diode mit geringerer Laserschwelle ein stabileres thermisches Verhalten bewirken.

Für den aufgebauten Prototyp können die ermittelten, temperaturabhängigen Leistungskurven verwendet werden um eine Regelung der Farbtemperatur zu implementieren. Die Lasertreiber verfügen sowohl über eine Ausgabe des Iststroms an der Diode wie auch über eine Rückmeldung der Diodentemperatur am Gehäuse. Mit der Rückführung dieser Größen kann die aufgenommene Kennlinie für jede der Dioden eingesetzt werden um den Diodenstrom an die vorliegende Gehäusetemperatur anzupassen und so die angestrebte Laserleistung für die jeweilige Diode einzustellen. Für die in den Anforderungen an den Laborbetrieb aufgeführten Temperaturdifferenzen von 10 K kann eine solche Regelung umgesetzt werden. Der weitaus größere Temperaturbereich für den Fahrzeugbetrieb kann mit dem umgesetzten Aufbau nur durch aktives Temperaturmanagement umgesetzt werden.

6.5 Diodenansteuerung

In den nachfolgenden Abschnitten wird das tatsächliche Schaltverhalten der Dioden mit ihren Treibern untersucht. Dazu wird die in Abschnitt 5.7 aufgeführte zeitliche Antwort der Dioden auf einen Vorgabestrom für das Ein- und das Ausschalten bei verschiedenen Betriebsströmen und Schaltfrequenzen bestimmt, was eine Aussage über die maximalen Ansteuerungsfrequenzen zulässt. Weiterhin wird die Stromregelung hinsichtlich der erreichten Maximal- und Minimalwerte gegenüber den Sollwerten betrachtet.

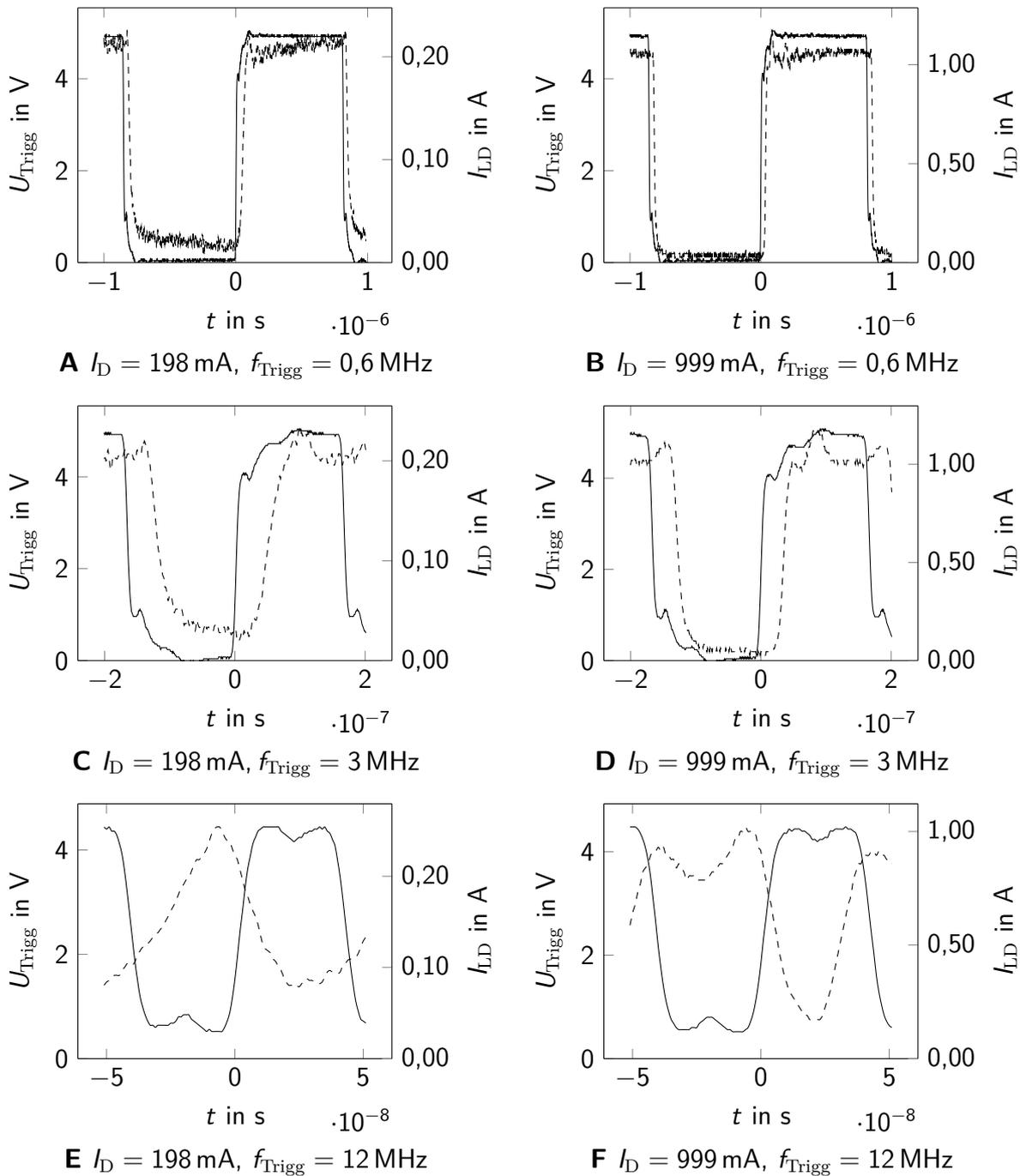
6.5.1 Anstiegszeit

Wie in Abschnitt 5.7 beschrieben, erfolgt das tatsächliche Einschalten der Laserdioden zeitlich versetzt nach dem Einschaltsignal, der Diodenstrom eilt dem Triggersignal also hinterher. Dieses Verhalten fällt insbesondere bei höheren Ansteuerungsfrequenzen stark ins Gewicht.

Der verwendete Lasertreiber erwartet ein Signal mit TTL-Level (Transistor-Transistor-Logik). Damit werden nach STINY [STIN16] Pegel ab 2 V als logisch *high* gewertet und der Treiber schaltet auf den vorgegebenen Diodenstrom I_D .

Das zeitliche Verhalten von Ansteuerung und Diodenstrom ist in den Diagrammen in Abbildung 6.9 exemplarisch für die blaue Diode aufgetragen. Um die Auswirkungen zu verdeutlichen, sind Triggerspannung und der resultierende Laserstrom jeweils für einen geringen Maximalstrom von etwa 200 mA und für einen hohen Maximalstrom von 1000 mA eingezeichnet. Weiterhin wird die Schaltfrequenz von 0,6 MHz bis hin zu 12 MHz gesteigert. Die Erzeugung der Schaltfrequenz erfolgt über den Funktionsgenerator AFG1022 der Firma Tektronix, der bis zu einer Frequenz von 12,5 MHz ein Rechtecksignal mit unter 12 ns Anstiegs- und Abfallzeit erzeugen kann. Die Erfassung erfolgt über ein digitales Oszilloskop DPO2014, ebenfalls von Tektronix, das über eine Genauigkeit von $\pm 3\%$ verfügt.

Für die Ermittlung von Anstiegszeiten und den resultierenden Diodenströmen werden Messungen bei drei verschiedenen Laserströmen durchgeführt. Die Betriebspunkte werden dafür so gewählt, dass einer im geringen Leistungsbereich nahe der Laserschwelle liegt, einer etwa in der Mitte des Betriebsbereichs und der dritte nahe am angegebenen Maximalstrom der Diode. Aus den Messungen werden die Anstiegszeiten τ_{rise} bestimmt, die ab dem Anliegen der Trig-



— Vorgabesignal U_{Trigg} (linke Achse) - - - - Laserstrom I_{LD} (rechte Achse)

Abbildung 6.9: Beispielbetrachtung an der blauen Laserdiode: Vorgabesignal der Ansteuerung U_{Trigg} (jeweils linke Achse) und resultierender Diodenstrom I_{LD} (jeweils rechte Achse)

gerspannung von 2 V bis zum Erreichen von 80 % des Zielstroms I_D auftreten. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 6.10 gegenübergestellt.

Für den blauen Laser liegt die Anstiegszeit zwischen 36 ns und 72 ns mit gleichmäßigen Verläufen. Beim grünen Laser ist die Anstiegszeit hingegen weniger konstant. Die Werte schwanken zwischen 32 ns und 103 ns und nehmen mit steigender Triggerfrequenz ab. Die Anstiegszeit des roten Lasers liegt mit 38 ns bis 72 ns in einem ähnlichen Bereich wie beim blauen Laser.

Beim blauen und roten Laser ist die Anstiegszeit trotz steigender Triggerfrequenz gleichmäßig. Beim grünen Laser sinkt die Anstiegszeit bei steigender Triggerfrequenz deutlich. Mit steigendem Strom I_D sinkt bei allen drei Lasern die Anstiegszeit.

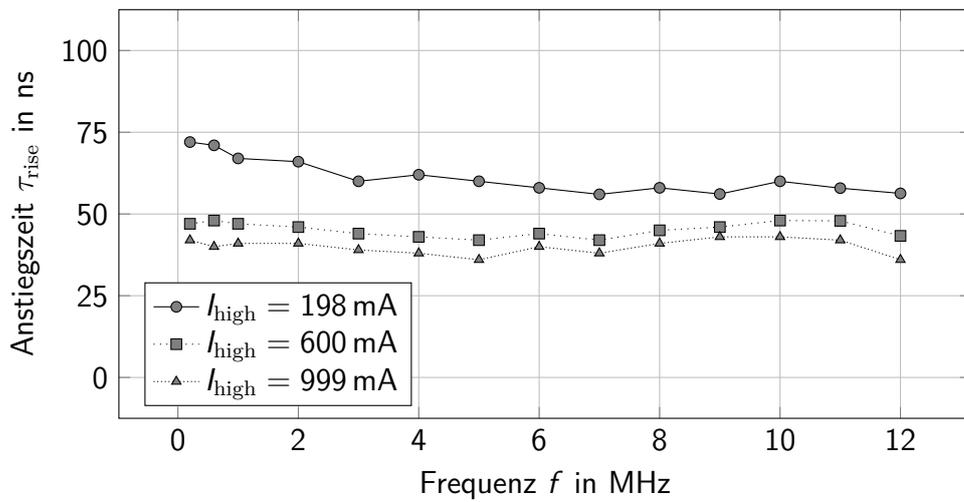
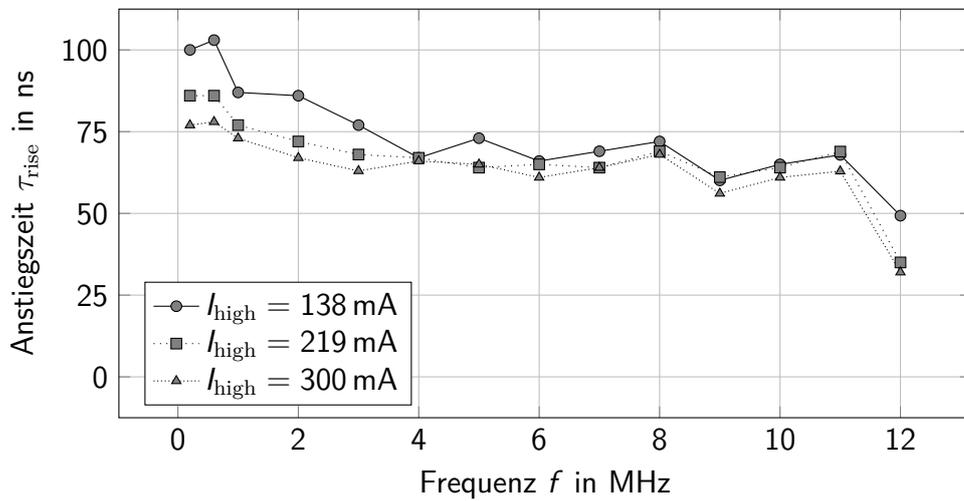
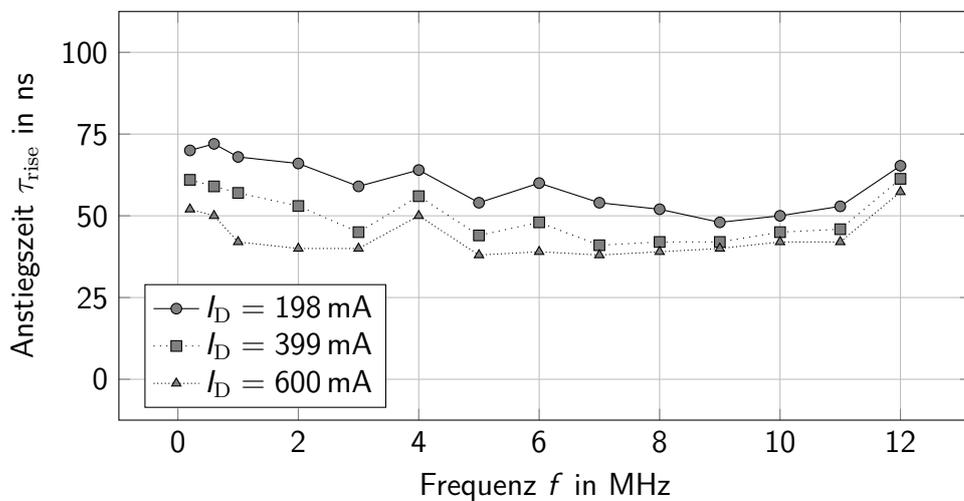
**A** Blauer Laser**B** Grüner Laser**C** Roter Laser

Abbildung 6.10: Zeitliches Verhalten zwischen Triggersignal und Diodenstrom (Anstiegszeit)

6.5.2 Abfallzeit

Die Abfallzeit wird ebenfalls nach dem in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Verfahren bestimmt, jedoch mit anderen Grenzwerten zum Auffinden der jetzt sinkenden Flanken. Nach STINY [STIN16] wertet ein Gerät einen TTL-Level $< 0,8\text{V}$ als logisch *low*. Deshalb wird der zu suchende Grenzwert für das Triggersignal auf $< 0,8\text{V}$ festgelegt. Der Grenzwert für den Diodenstrom wird auf 20 % des vorgegebenen Stroms I_D festgelegt.

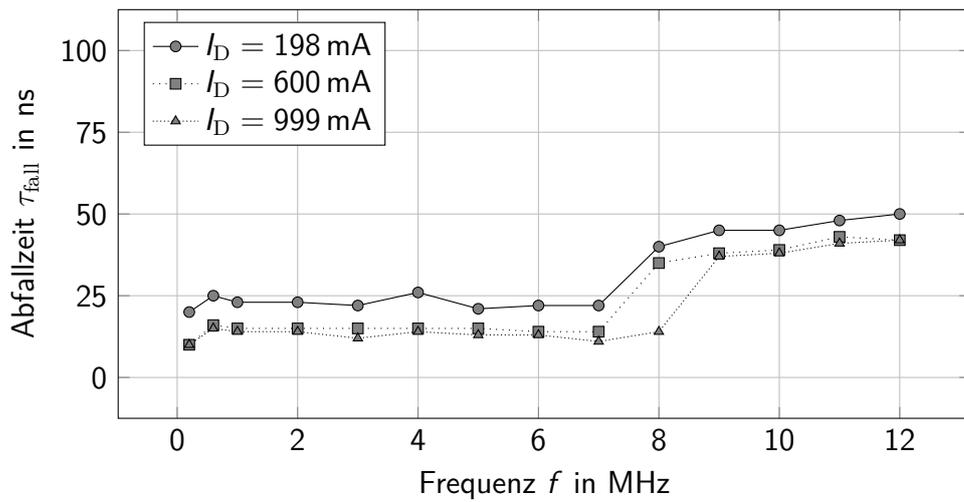
Die Abfallzeit ist in Abbildung 6.11 dargestellt und liegt für den blauen Laser zwischen 20 ns und 69 ns. Beim grünen Laser liegt sie zwischen 45 ns und 106 ns und beim roten Laser zwischen 29 ns und 82 ns. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Abfallzeit beim blauen Laser am geringsten ist. Beim roten Laser ist sie etwas größer. Die Abfallzeit des grünen Lasers liegt deutlich höher als die des blauen. Auffällig ist außerdem, dass die Abfallzeit für kleinere Frequenzen bei allen Lasern bei den beiden höheren Betriebsströmen konstant ist und bei 8 MHz bzw. 9 MHz sprunghaft ansteigt. Das liegt an Überschwingern im Triggersignal bei diesen hohen Frequenzen, wie in Abbildung 6.9 zu sehen ist. Wie schon bei der Anstiegszeit, ist auch bei der Abfallzeit eine Verringerung des Werts mit steigendem Diodenstrom zu erkennen.

Im Vergleich zwischen der Anstiegszeit und der Abfallzeit ergibt sich, dass die Anstiegszeit etwas größer als die Abfallzeit ist. Jedoch sind Ein- bzw. Ausschaltdauer auch von den gewählten Grenzwerten für den Diodenstrom abhängig. Außerdem tritt das Phänomen auf, dass sich die Laserdioden zwischen den einzelnen Pulsen bei hohen Triggerfrequenzen nicht mehr komplett ausschalten. Dieses Verhalten wird im folgenden Abschnitt weiter untersucht.

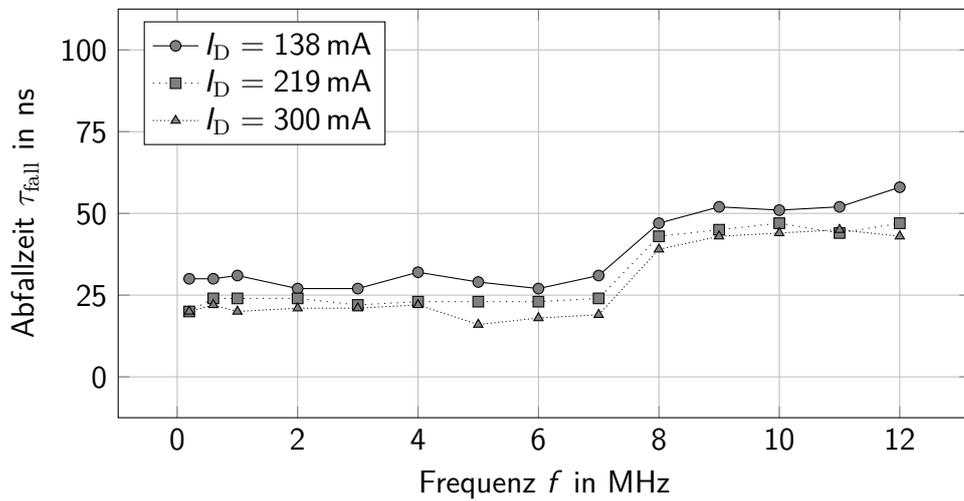
Tabelle 6.5: Bilderzeugung mit dem Demonstratoraufbau

	Laser rot	Laser grün	Laser blau
Laserleistung $P_{\text{opt},1}$	320 mW	130 mW	220 mW
Betriebsstrom I_A	500 mA	300 mA	400 mA
Anstiegszeit 1 MHz $\tau_{\text{rise},1\text{MHz}}$	42 ns	73 ns	47 ns
Abfallzeit 1 MHz $\tau_{\text{fall},1\text{MHz}}$	14 ns	20 ns	20 ns
Zeit pro Bildpunkt t_{Pixel}	1164 ns	1127 ns	1153 ns

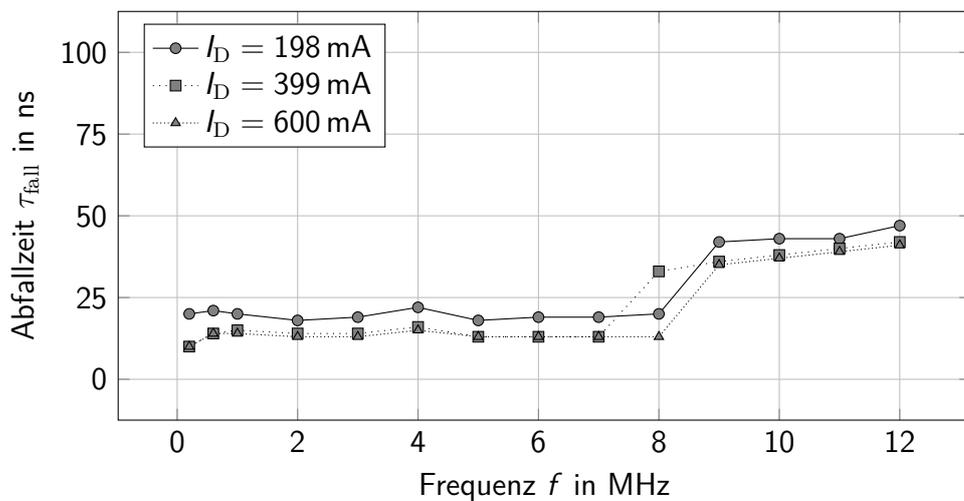
Für den aufgebauten Demonstrator sind in Tabelle 6.5 für die vorgesehene Ansteuerung mit etwa 1 MHz die Anstiegs- und Abfallzeit für den in Abschnitt 6.1 betrachteten Betriebspunkt dargestellt. Die nach Gleichung 3.14 bestimmte Zeit für einen Bildpunkt liegt bei $1,22\ \mu\text{s}$ für



A Blauer Laser



B Grüner Laser



C Roter Laser

Abbildung 6.11: Zeitliches Verhalten zwischen Triggersignal und Diodenstrom (Abfallzeit)

die angestrebte Auflösung von 128×64 Pixeln. Anhand der bei 1 MHz ermittelten Anstiegs- und Abfallzeiten werden dann die Zeiten t_{Pixel} bestimmt, für die ein Bildpunkt tatsächlich als angeschaltet betrachtet werden kann.

Für den verwendeten Betriebszustand kann also davon ausgegangen werden, dass die Ansteuerung ausreichend schnell ist, ein Bild mit 128×64 Pixeln darzustellen. Die Unterschiede in den Anzeigzeiten der verschiedenfarbigen Bildpunkte lassen sich in den projizierten Bildern nicht erkennen, weshalb die vorhandene Ansteuerung als ausreichend betrachtet wird. Für eine Weiterentwicklung ist jedoch eine Kompensation der Zeitunterschiede gegebenenfalls in Betracht zu ziehen und bei der Ansteuerung entsprechend zu berücksichtigen.

6.5.3 Regelung des Diodenstroms

Der Verlauf des Diodenstroms weist in fast allen Betriebspunkten Überschwinger gegenüber dem Sollwert auf. Die tatsächlich erreichten Ströme übersteigen die Sollwerte um bis zu 28 %, liegen in den meisten Fällen jedoch weniger als 20 % darüber. Beispielhaft für einen ausgewählten Betriebszustand je Diode ist dieses Verhalten in Abbildung 6.12 dargestellt. Insbesondere

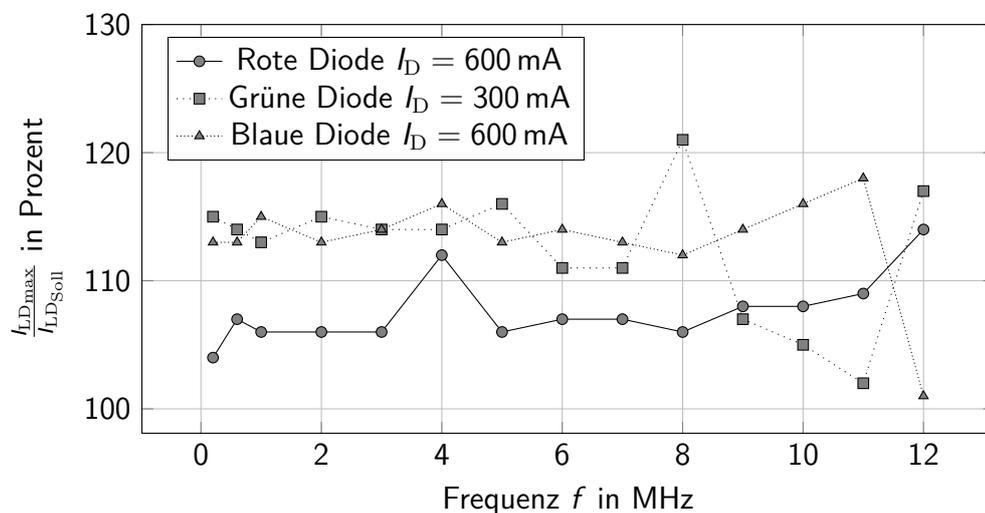


Abbildung 6.12: Verhältnis von maximalem Diodenstrom zur Stromvorgabe I_D

bei Betriebspunkten nahe der Belastungsgrenze der Laserdiode muss dieses Verhalten berücksichtigt werden, da ein häufiges, wenn auch kurzzeitiges, Überschreiten der Betriebsgrenzen der Dioden ihre Lebensdauer deutlich verkürzt und zu vorzeitigem Ausfall führt.

Die in Abbildung 6.9 dargestellten Messergebnisse zeigen auch, dass der Diodenstrom in der Ausschaltphase in einigen Betriebspunkten nicht den Wert 0 erreicht. Der Laser wird in diesen

Punkten also nicht vollständig abgeschaltet. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wird der minimale Diodenstrom in jedem Betriebspunkt ins Verhältnis zum vorgegeben Sollwert für den An-Zustand gesetzt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 6.13 aufgeführt.

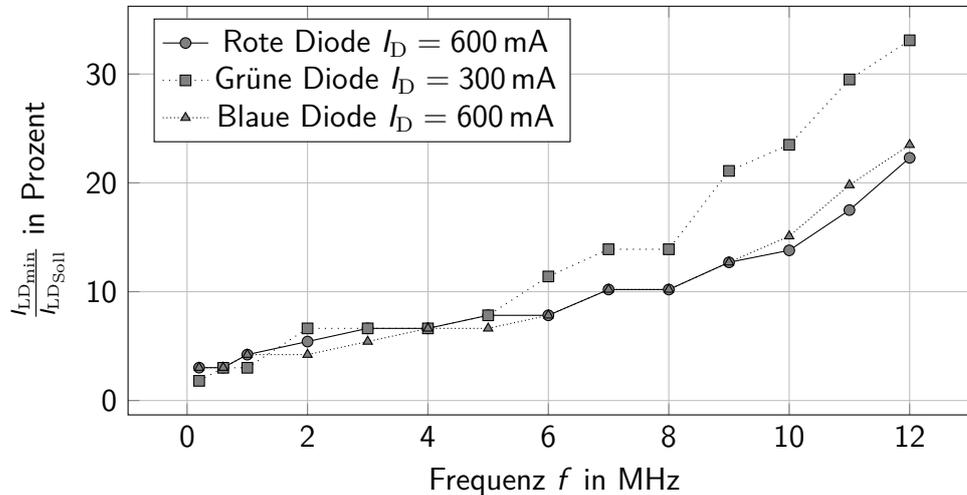


Abbildung 6.13: Verhältnis von minimalem Diodenstrom zur Stromvorgabe I_D

Es ist zu erkennen, dass die erreichbare Untergrenze für den Diodenstrom bei allen Lasern mit steigender Triggerfrequenz deutlich ansteigt. Somit wird bei hohen Triggerfrequenzen der Laser nicht zuverlässig zwischen den einzelnen Pulsen abgeschaltet. Insbesondere wenn der Diodenstrom nicht unter die Laserschwelle des jeweiligen Lasers sinkt, kann dieses Verhalten zu unerwünschten Effekten führen, da der Laser nur zwischen unterschiedlichen Intensitäten wechselt, jedoch nicht vollständig ausgeschaltet wird. Für die eingesetzten Schaltfrequenzen von etwa 1 MHz sind derartige Effekte jedoch nicht zu erwarten, wie auch schon aus den Betrachtungen in den vorherigen Abschnitten hervorgeht. Für eine Steigerung der Auflösung und eine daraus resultierende höhere Schaltfrequenz sind diese Punkte jedoch von Bedeutung.

6.6 Wirkung im Verkehrsraum

Nach der Validierung der optischen und elektrischen Eigenschaften des Prototyps für ein scanndes Projektionssystem in den vorangegangenen Abschnitten soll nun die Wirkung im Verkehrsraum untersucht werden. Dazu wird der Aufbau in Scheinwerferhöhe vor einem Fahrzeug montiert ($z_{SW} = 0,9\text{ m}$) und auf den Verkehrsraum ausgerichtet. Die Projektion ist so ausgerichtet, dass die Unterkante des projizierten Bildes in 5 m Entfernung von der Fahrzeugfront beginnt und mit der Oberkante in 15 m Entfernung endet, also der gesamte Darstellungsbereich aus den Anforderungen in Abschnitt 3.2.1 ausgefüllt wird.

Zusätzlich zur Informationsprojektion wird aus den Scheinwerfern des Fahrzeugs eine Abblendlichtverteilung erzeugt, mit der die Bilder dann überlagert werden, um die Überlegungen aus Abschnitt 3.2.2 zu validieren. Fotos von zwei projizierten Symbolen sind in den Abbildungen 6.14 und 6.15 zu sehen. Es handelt sich dabei um die Verkehrszeichen *STOP* (Zeichen 206 nach StVO) und *Höchstgeschwindigkeit 60 km/h* (Zeichen 274-56 nach StVO), die über eine Kamera aus der Fahrerperspektive fotografiert sind.



Abbildung 6.14: Projektion von Zeichen 206 nach StVO (Halt! Vorfahrt gewähren!) [ROTH15]

Bei der gewählten Größe der Projektion ist die Darstellung sowohl sichtbar als auch zu erkennen. Die dargestellten Symbole verfügen zusätzlich zur farbigen Darstellung auch über Weißanteile, die sich klar vom Abblendlicht abheben. Bei den eingestellten Werten handelt es sich um den in Abschnitt 6.1 vermessenen Weißpunkt aus 81,5 mW Rot, 51,5 mW Grün und 75 mW Blau am Ausgang des Mikrospiegels. In der Projektion hebt sich das verwendete weiße Licht deutlich vom Abblendlicht ab, so dass eine gute Erkennbarkeit gegeben ist.



Abbildung 6.15: Projektion von Zeichen 274-56 nach StVO (Zulässige Höchstgeschwindigkeit 60 km/h) [ROTH15]

Die Bilder sind in der Beispielprojektion in einem sehr großen Darstellungsbereich angezeigt, der insbesondere zur Projektion von Fahrerassistenzinformationen zur Verstärkung der Kontraste und Intensitäten reduziert werden kann. Da eine Erkennbarkeit der dargestellten Informationen bereits mit der großen Projektionsfläche gegeben ist, ist das umgesetzte Konzept für die Informationsprojektion geeignet und kann auf weitere Anwendungen im Straßenverkehr hin untersucht werden. Besonders die in Abschnitt 3.1 angeführten, dynamischen Projektionen, beispielsweise von Pfeilen oder pfeilähnlichen Strukturen, bieten eine gute Möglichkeit, die Informationsdarstellung zusätzlich zu verbessern. Um eine weitere Erhöhung der Sichtbarkeit der dargestellten Informationen zu erzielen, kann außerdem die Intensität der Abblendlichtverteilung im Projektionsbereich reduziert werden. Dies ist allerdings nur möglich, wenn der Hauptscheinwerfer eine entsprechend hohe Auflösung besitzt.

In Kombination mit einer kamerabasierten Umgebungserfassung lässt sich im gewählten Projektionsbereich außerdem eine kontaktanaloge Darstellung von Informationen realisieren. Dies ist mit Head-Up-Displays nur umsetzbar, wenn zusätzlich eine Erfassung der Augenposition des Fahrers erfolgt.

Die optimale Form und Größe der darzustellenden Informationen muss noch weitergehend betrachtet werden. Bei einer Expertenbefragung, bei der verschiedene Symbolgrößen projiziert wurden, zeigte sich, dass insbesondere Darstellungen, die breiter als die eigene Fahrspur sind, als zu groß empfunden werden. Weitere Untersuchungen sind ebenfalls hinsichtlich der Projektion von Informationen zur Kommunikation mit der Umgebung erforderlich. Laut

KRAHNSTÖVER ET AL. [KRAH16] muss mit einer geringeren Akzeptanz der dargestellten Handlungsaufforderungen gerechnet werden, wenn die adressierte Person keine solche Kommunikation erwartet.

Der zuvor angesprochene Effekt der Laserspeckles, die bei der Beleuchtung mit kohärentem Licht auftreten, ist bei einer Bildprojektion auf der Straße nicht zu erkennen. In den Fotos (Abbildungen 6.14 und 6.15) wie auch in der Realität sind bei dieser Darstellung keine Speckles für das menschliche Auge sichtbar und auch bei Projektionen mit jeweils einer der Laserdioden einzeln angeschaltet führen zu demselben Ergebnis. Hierbei kommt sowohl die raue Oberflächenstruktur der Straße wie auch die Tatsache, dass der Strahl gescannt wird, zum Tragen. Für den Fahrbetrieb ist außerdem mit zusätzlichen Schwingungen zu rechnen, die ebenfalls zu einer Reduzierung von Speckles führen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Im Zuge der vorliegenden Arbeit ist ein laserbasiertes Projektionssystem entstanden, das entsprechend der in Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen für die dynamische Informationsdarstellung im Verkehrsraum eingesetzt werden kann. Dazu werden die Herausforderungen einer Projektion in den Verkehrsraum anhand von bestehenden Systemen erarbeitet und quantifiziert. Insbesondere die Darstellung dynamischer, farbiger Bilder im Verkehrsraum zur Kommunikation des Fahrzeugs mit dem Fahrer oder der Umgebung kann als wichtiges Element für die weitergehende Arbeit ermittelt werden. Für die Darstellung dieser Funktion werden daraufhin die Anforderungen an die prototypische Umsetzung eines entsprechenden Systems aufgestellt. Dies erfolgt unter den Gesichtspunkten des angestrebten Projektionsbereichs, der erforderlichen Lichtströme für unterschiedliche Beleuchtungsszenarien, der darzustellenden Farben sowie der charakteristischen Bilderzeugungseigenschaften. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erfolgt die Erstellung und Bewertung verschiedener Umsetzungskonzepte für die dynamische Bilderzeugung. Kernelement dieser Konzepte ist die Bilderzeugungseinheit, für die die unterschiedlichen Elemente DMD, LCD, LCoS, Matrix-LED, Rotationsspiegel und MEMS/ Mikrospiegel untersucht und verglichen werden.

Die vorgestellten Konzepte ermöglichen eine hochauflösende Bilderzeugung vor dem Fahrzeug, jedoch unter Berücksichtigung der angestrebten farbigen Projektion auf eine dynamisch anpassbare Fläche ergeben sich die größten Vorteile für die Umsetzung in Form eines scannenden Systems bestehend aus einer dreifarbigem Laserlichtquelle mit je einer roten, grünen und blauen Laserdiode in Verbindung mit einem zweiachsigen Mikrospiegel als Bilderzeugungseinheit. Insbesondere im Hinblick auf das Kontrastverhältnis und die Qualität der Farbdarstellung können so optimale Werte erzielt werden. Da die angestrebte Umsetzung aufgrund der scannenden

Bilderzeugung ohne Projektionsoptik auskommt, kann außerdem unabhängig vom Abstand der Projektionsfläche eine scharfe Abbildung erzeugt werden.

Für die weitere Auslegung des Systems werden Verfahren zur Strahlkombination aus mehreren Laserdioden untersucht und Konzepte vorgestellt, Bilder in der gewünschten Lichtfarbe zu erzeugen. Bei den Prinzipien zur Farbmischung werden sowohl geometrische Umlenkungsprinzipien wie ein Lichtleiter oder die gezielte Ansteuerung einzelner Dioden einer versetzten Anordnung betrachtet und bewertet, als auch spektral kombinierende Systeme auf Grundlage der wellenlängenabhängigen Reflexion und Transmission verschiedener Materialien. Als Ergebnis zeigt sich die Verwendung einzelner, dichroitischer Spiegel als am besten geeignet für einen Prototypen zur Funktionsdemonstration, so dass die Umsetzung entsprechend mit einem zweiachsigen Mikrospiegel und einer dichroitisch überlagerten RGB-Laseranordnung erfolgt.

Die Ansteuerung des Mikrospiegels über ein Signal in der Resonanzfrequenz der schnellen Achse und ein quasistatisches Signal in der langsamen Achse erlaubt das Aufspannen eines Bildbereichs vor dem Fahrzeug im Bereich von 5 m bis 15 m. Der aufgebaute Prototyp mit einer Diodenansteuerung von bis zu 27 MHz erzeugt Bilder mit einer Auflösung von 128 x 64 Pixeln bei einer Bildwiederholfrequenz von 100 Hz. Mit diesen Randbedingungen konnte die Darstellung von Symbolen anhand von Beispielen validiert werden. Die Informationsdarstellung vor dem Fahrzeug ermöglicht so im Vergleich mit vielen handelsüblichen Head-Up-Displays eine größere Darstellungsfläche für die Informationen und erlaubt die konstante Fokussierung des Fahrers auf den Verkehrsraum vor dem Fahrzeug. Die Darstellung der Informationen erfolgt somit so, dass keine Blickabwendung oder Akkommodation des Auges erforderlich ist. Zusätzlich dazu eröffnen sich Möglichkeiten zur kontaktanalogen Projektion von Informationen, so dass sie eine Erweiterung von Umgebungsmerkmalen wie beispielsweise Fahrbahnmarkierungen darstellen.

Mit einem Lichtstrom von bis zu 170 lm und einer mittleren resultierenden Beleuchtungsstärke von 8,5 lx kann eine Sichtbarkeit der Projektion bei untergegangener Sonne mit angeschalteten Scheinwerfern gewährleistet werden. Dies konnte anhand des Prototypenaufbaus ebenfalls validiert werden. Für eine darüber hinausgehende Sichtbarkeit bei hellerer Umgebung kann der gegenwärtige Aufbau durch Reduzierung des Bildbereichs eingesetzt werden, bei einer Weiterentwicklung des Aufbaus ist mit der fortschreitenden Entwicklung von Hochleistungslaserdioden eine zusätzliche Steigerung des Lichtstroms erzielbar.

Für den Einsatz im Laborbetrieb mit konstanten Umgebungsbedingungen zwischen 20 °C und 25 °C ist der Prototyp ohne aktive Kühlung einsetzbar, jedoch führen bereits geringe Temperaturschwankungen am Diodengehäuse und damit auch im Inneren der Diode zu Veränderungen in der Abstrahlleistung und damit auch in der erzeugten Lichtfarbe. Abhängig vom gewählten Betriebspunkt der Diode fällt diese Differenz unterschiedlich groß aus und ist am größten nahe der Laserschwelle, die sich außerdem temperaturabhängig verschiebt. Für eine über den Betrieb konstante Farbe des erzeugten Bildes ist eine Temperaturüberwachung der Dioden mit einer Anpassung des Laserstroms somit unerlässlich. Zusätzlich dazu zeigt auch der verwendete Mikrospiegel eine thermische Abhängigkeit seiner Resonanzfrequenz, die sich bereits durch die Veränderung der aufgebrachten Laserleistung zeigt. Für den Betrieb des Aufbaus ist deshalb eine Lageüberwachung des Mikrospiegels erforderlich und in die Ansteuerung integriert. Für einen Betrieb unter realen Bedingungen im Fahrzeugumfeld wird ein Temperaturbereich von –40 °C bis 80 °C angestrebt, der sich nur über ein aktives Thermomanagement des Laserscanners umsetzen lässt.

Der umgesetzte Prototypenaufbau erreicht je nach Diode einen optischen Wirkungsgrad für die Strahlformung und -überlagerung von etwa 35 % bis 50 %, was durch den Wirkungsgrad des Mikrospiegels, der für die verschiedenen Farben zwischen 68 % und 77 % liegt, noch einmal entsprechend reduziert wird. Insbesondere eine angepasste Beschichtung des Mikrospiegels bietet hier zusätzliches Potenzial für eine Effizienzsteigerung, zusätzlich sind auch Optimierungen an den Primäroptiken sinnvoll. Der Aufbau und die damit erforderlichen Strahlwege führen weiterhin zu einer ungünstigen Winkeleinstellung für den dichroitischen Spiegel, der das blaue Licht zum Strahl hinzufügt. Dieser ist für einen Einsatzbereich bei 45° ausgelegt, wird aber geringfügig verdreht eingesetzt, was zu einer zusätzlichen Reduzierung im Wirkungsgrad führt. Eine speziell an das Emissionsverhalten angepasste Primäroptik für die blaue Diode würde hier den Winkel von 45° ermöglichen und damit eine Wirkungsgradsteigerung bedeuten. In dem Fall muss allerdings trotzdem eine Einstellmöglichkeit der Strahlführung über einen Umlenkspiegel vorgesehen werden.

Durch die Bedingung der Flexibilität und Einstellungsmöglichkeiten der optischen Elemente sowie der Laserdioden ist der vorgestellte Aufbau in seinen Abmaßen entstanden. Bei einer feststehenden Positionierung der einzelnen Elemente und angepassten Primäroptiken ist an dieser Stelle eine Bauraumreduktion möglich, was insbesondere beim angestrebten Einbauort auf Scheinwerferhöhe in der Mitte des Fahrzeugs ein wichtiger Aspekt ist.

Eine Betrachtung der Lasersicherheit am aufgebauten Prototypen ergibt für den vollen Projektionsbereich von 20 m^2 bei funktionierendem Mikrospiegel eine Gefährdung durch Laserstrahlung bei Entfernungen unterhalb von $2,2 \text{ m}$ vor dem Lichtaustritt. Dies ergibt sich aus der EG Richtlinie 2006/25/EG, die die Leistungsdichte der Strahlung sowie eine zehnstündige Exposition berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass für eine derartige Gefährdungsdistanz geeignete Maßnahmen seitens der Fahrzeugelektronik zur Verfügung stehen, um eine Schädigung von Menschen oder Tieren auszuschließen. Einerseits ist dann der Projektionsbereich nicht frei und andererseits kann in diesem Bereich vor dem Fahrzeug keine zehnstündige Einwirkung erzielt werden, wenn das Fahrzeug zumindest geringfügig in Bewegung ist. Da für die Projektion eine Reduzierung des Darstellungsbereichs bis hin zu 1 m^2 vorgesehen ist, werden auch kleinere Flächen berücksichtigt. Hier liegt eine entsprechende Gefährdung bereits unterhalb von 30 m vor dem Lichtaustritt vor, was also in jedem Fall geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von Gefahren erfordert. Eine entsprechende Beurteilung von Szenarien wird durchgeführt und das Gefährdungspotenzial untersucht. Das Ergebnis ist, dass zur Wahrung der Sicherheit von Lebewesen in der Umgebung des Projektionssystems eine Überwachung der Funktionsfähigkeit des Mikrospiegels und eine freie Projektionsfläche gegeben sein müssen. Weiterhin muss die Funktion des Systems an eine Mindestgeschwindigkeit gekoppelt werden.

Im Vergleich mit den Forschungsthemen im Bereich hochauflösender Scheinwerfer eignet sich das hier vorgestellte System damit insbesondere für die Darstellung farbiger Fahrerassistenzfunktionen, die einen erheblichen Beitrag zur Steigerung der Verkehrssicherheit leisten können. Auch im Kontext autonom fahrender Fahrzeuge gewinnt die Kommunikation mit der Fahrzeugumgebung an Bedeutung. Während die Darstellung von Fahrerassistenzinformationen auch über Head-Up-Displays möglich ist, kann die Kommunikation mit der Umgebung nur über eine Darstellung nach außen erreicht werden. Hier sind mögliche Funktionen beispielsweise die Kommunikation mit Fahrradfahrern um ihnen mitzuteilen, dass sie die Kreuzung überqueren können, oder die Unterstützung von Einfädelsituationen auf der Autobahn. Für letzteres ist eine Vergrößerung des Projektionsbereichs über die hier untersuchten 15 m hinaus erforderlich.

7.2 Ausblick

Für eine Weiterentwicklung der Technologie wird der Einsatz zukünftiger Laserdioden mit höherer optischer Maximalleistung und geringerer thermischer Verluste zu einer Verbesserung der Sichtbarkeit von dargestellten Informationen führen. Eine Steigerung der optischen Ausgangsleistung kann außerdem über die Kombination von je zwei gleichen Dioden mit Hilfe von polarisationsabhängigen Strahlteilerspiegeln erreicht werden. Durch eine Optimierung der Diodensteuerung hinsichtlich der Schaltgeschwindigkeiten der einzelnen Laser ist darüber hinaus eine Erhöhung der Auflösung möglich. Der vorgestellte Aufbau bietet weiterhin das Potenzial, durch den Einsatz industrieller Fertigungs- und Montageverfahren auf einen kompakten Bau- raum reduziert zu werden. In diesem Zuge ist auch eine Optimierung der einzelnen optischen Komponenten sinnvoll und beispielsweise der Einsatz einer integrierten Lösung dichroitischer Spiegel in Form eines Prismenwürfels (Combiner Cube) vorzusehen. Im nächsten Schritt ist eine Kombination des aufgebauten Laserscanners mit weiteren Fahrzeugsensoren erforderlich um etwa kamerabasiert die Projektionsfläche zu erfassen und festzustellen, ob diese frei ist. Dies ist auch für Umsetzung der ermittelten Maßnahmen zur Lasersicherheit ein wichtiger Schritt. Hierbei sollten außerdem weitere Fahrzeugsensoren wie etwa zur Abstandsbestimmung umliegender Objekte eingesetzt werden. Mit einer serientauglichen Weiterentwicklung der vorgestellten Technologie steht insbesondere beim Einsatz in autonomen Fahrzeugen ein wichtiges Hilfsmittel zur Kommunikation mit den Insassen sowie mit der Umgebung des Fahrzeugs zur Verfügung. Dieses Konzept gewinnt besonders an Bedeutung, wenn eine Sichtbarkeit der angezeigten Informationen bei Tageslicht gegeben ist. In Kombination mit neu entwickelten, hochauflösenden Scheinwerfern für die Ausleuchtung des Verkehrsraums können weiterhin Konzepte erarbeitet werden, an den Stellen der Informationsprojektion die Abblendlichtverteilung abzumindern um die Darstellung zu unterstützen und die darzustellenden Bilder so als Summe von Abblendlicht und Symbolprojektion zu erzeugen. In einem weiteren Schritt kann das System um zusätzliche Laserdioden erweitert werden, die Strahlung außerhalb des sichtbaren Bereichs emittieren und so der Kamerasensorik des Autos die Möglichkeit geben, zusätzliche Informationen über die Umgebung zu sammeln. So erzeugte Bilder sind eine Möglichkeit zur Erfassung von 3D-Informationen der Umgebung, was wiederum eine angepasste Projektion der Informationen ermöglicht. Die vorgestellte Technologie eines RGB-Scanners bietet somit großes Potenzial, die Sicherheit von zukünftig entwickelten Fahrzeugen und von deren Insassen zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- [AMSE10] AMSEL, Christian; FLORISSEN, Georg; PIETZONKA, Steffen: Die Nächste Generation Lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 112 (2010), Nr. 10, S. 758–763. – ISSN 2192–8800.
- [ASAK78] ASAKURA, Toshimitsu: Surface Roughness Measurement. In: ERF, Robert K. (Hrsg.): *Speckle metrology*. New York: Academic Press, 1978 (Quantum electronics–principles and applications). – ISBN 0–12–241360–1, S. 11–48.
- [BAEH13] BAEHR, Hans D.; STEPHAN, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung*. 8. Auflage. Berlin and New York: Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978–3–642–36557–7.
- [BASU13a] 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.
- [BASU13b] BASU, Chandrajit; MEINHARDT-WOLLWEBER, Merve; ROTH, Bernhard: Lighting with laser diodes. In: *Advanced Optical Technologies 2* (2013), Nr. 4, S. 313–321.
- [BAUM04] BAUMEISTER, Philip W.: *Optical coating technology*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2004.
- [BAUM12] BAUMGART, Marcus; TORTSCHANOFF, Andreas: Theoretical aspects and derived design rules for optical angle position sensing of tilt mirrors. In: *2012 International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT 2012)*, 2012, S. 1–6.
- [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.
- [BÖHM09] BÖHM, Michael; KREMS, Josef F.; LOCHER, Jürgen: Efficacy of Adaptive Front-Lighting Systems - A Field Study Under Further Consideration of Drivers' Customary High Beam Usage Behaviour. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 13. München: Utz, 2009, S. 238–242.
- [BONE13] BONENBERGER, Theresa S.; BAUMGART, Jörg; WENDEL, Simon; NEUMANN, Cornelius: LED color mixing with diffractive structures. In: *Proc. SPIE 8641, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVII* (2013).
- [BONE16] BONENBERGER, Theresa S.; BAUMGART, Jörg; NEUMANN, Cornelius: Angular and spatial color mixing using mixing rods with the geometry of a chaotic-dispersive billiard system. In: *Advanced Optical Technologies* 5 (2016), Nr. 2.
- [CHAV08] CHAVES, Julio: *Optical science and engineering*. Bd. 134: *Introduction to nonimaging optics*. Boca Raton: CRC Press, 2008. – ISBN 978–1–4200–5429–3.
- [CHOW99] CHOW, Weng W.; KOCH, Stephan W. (Hrsg.): *Semiconductor-Laser Fundamentals : Physics of the Gain Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999.
- [COLE00] COLEMAN, Christopher; WEISSMAN, Robert H.; GROT, Annette: Applications of diffractive optics with LED sources. In: *Diffractive Optics and Micro-Optics*, Optical Society of America, 2000.
- [COMT99] COMTOIS, John; MICHALICEK, Adrian; COWAN, William; BUTLER, Jeffrey: Surface-micromachined polysilicon MOEMS for adaptive optics. In: *Sensors and Actuators A* (1999), Nr. 78, S. 54–62.
- [DAMB12] DAMBÖCK, Daniel; WEISSGERBER, Thomas; KIENLE, Martin; BENGLER, Klaus: Evaluation of a contact analog head-up display for highly automated driving. In: *4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. San Francisco. USA, 2012.

- [DEMT13] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-29944-5.
- [DEUT12] DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT (Hrsg.): *Vision Zero - Grundlagen und Strategien*. Bonn, 2012.
- [DOHE98] DOHERTY, D.; HEWLETT, G.: 10.4: Phased Reset Timing for Improved Digital Micromirror Device (DMD) Brightness. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 29 (1998), Nr. 1, S. 125–128. – ISSN 2168-0159.
- [DUPU87] DUPUIS, R.: Preface. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 23 (1987), Nr. 6, S. 658–658.
- [EICH15] EICHLER, Hans-Joachim; EICHLER, Jürgen: *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 978-3-642-41438-1.
- [FAN05] FAN, T. Y.: Laser beam combining for high-power, high-radiance sources. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 11 (2005), Nr. 3, S. 567–577. – ISSN 1077-260X.
- [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.
- [GELA12] GELAU, Christhard; GASSER, Tom M.; SEECK, Andre: Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-8619-4, S. 24–32.

- [GENG97] GENGENBACH, Rolf: *Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display : Gewöhnung und visuelle Aufmerksamkeit*. Düsseldorf, Dissertation, 1997. – Nebent.: Fahrerverhalten im Pkw mit HUD.
- [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.
- [GU-S14] GU-STOPPEL, S; JANES, J; QUENZER, HJ; HOFMANN, U; BENECKE, W: Two-dimensional scanning using two single-axis low-voltage PZT resonant micromirrors. In: *Proc. SPIE* Bd. 8977, 2014.
- [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.
- [GUT16] GUT, Car; CRISTEA, Iulia; NEUMANN, Cornelius: High-resolution headlamp. In: *Advanced Optical Technologies* 5 (2016), Nr. 2, S. 109–116.
- [HAFE11] HAFERKEMPER, Nils; SÖLLNER, Stefan; POLIN, Dmitrij; BODROGI, Peter; KHANH, Tran Q.: Brightness perception in the mesopic range - models and new laboratory experiments. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 14. München: Utz, 2011. – ISBN 3–8316–4093–9, S. 53–60.

- [HAGE14] HAGER, Thomas: *Untersuchungen an AlGaInN-basierten Laserdioden im sichtbaren Spektralbereich*. Marburg, Philipps-Universität, Dissertation, 2014.
- [HAMA13] HAMAMATSU PHOTONICS K.K.: *HamamatsuNews: From Macro to Micro*. 2013.
- [HAMA14] HAMAMATSU PHOTONICS K.K.: *Datasheet of S12238-01P(X)*. 2014.
- [HANA10] HANAFI, Abdel; HECKMANN, Hans G.; GUSE, Frank: Laser Projection for Head-up Displays: a New Technology for Image Generation. In: VDI (Hrsg.): *4. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* Bd. 2090. Düsseldorf: VDI-Verl., 2010. – ISBN 978-3-18-092090-0.
- [HANA13] HANAFI, 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. – ISBN 3-540-67213-3.
- [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.
- [HOFM13] HOFMANN, Ulrich; AIKIO, Mika; JANES, Joachim; SENGER, Frank; STENCHLY, Vanessa; HAGGE, Juergen; QUENZER, Hans-Joachim; WEISS, Manfred; VON WANTOCH, Thomas; MALLAS, Christian; WAGNER, Bernhard; BENECKE, Wolfgang: Resonant biaxial 7-mm MEMS mirror for omnidirectional scanning. In: *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 13 (2013), Nr. 1.

- [HÖPE10] HÖPE, Andreas; HAUER, Kai-Olaf: Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials. In: *Metrologia* 47 (2010), Nr. 3.
- [JÜRIG15] JÜRIGENS, Christian: *Der kontrastadaptive Scheinwerfer: Dissertation*. Hannover: TEWISS, 2015. – ISBN 978–3–95900–015–4.
- [JÜST13] JÜSTEL, Thomas: *Optimale Leuchtstoffe für LED-Applikationen*, Präsentation auf der 9. Tagung: LED in der Lichttechnik, 2013.
- [KHAN15a] KHANH, Tran Q. (Hrsg.); BODROGI, Peter (Hrsg.); VINH, Quang T. (Hrsg.); WINKLER, Holger (Hrsg.): *LED lighting : technology and perception*. Weinheim: Wiley-VCH Verl., 2015.
- [KHAN15b] KHANH, Tran Q.; HUHN, Wolfgang: Sichtverbesserungssysteme. In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); LOTZ, Felix (Hrsg.); SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Berlin: Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978–3–658–05734–3.
- [KLOP16a] KLOPPENBURG, Gerolf; ROTH, Joscha; WOLF, Alexander; LACHMAYER, Roland: Optische Eigenschaften eines RGB-Laserprojektionsmoduls für den Verkehrsraum. 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. 255–267.
- [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.
- [KNOL10] KNOLL, Peter: Fahrerassistenzsysteme. In: REIF, Konrad (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010. – ISBN 978–3–8348–9717–6, S. 104–121.
- [KRAH16] KRAHNSTÖVER, Anna Z.; THOMSCHKE, Sebastian; KOETHER, Gunnar; VOLLRATH, Mark: Licht führt?! – Einsatzmöglichkeiten von lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen in Einfädelsituationen. 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. 245–254.

- [KRAH17] KRAHNSTÖVER, Anna Z.: *Licht Führt!?: Konzeption und Evaluation Von Fahrmanöverunterstützung Durch Lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme* -. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2017. – ISBN 978-3-658-17161-2.
- [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; 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.
- [LACH14b] 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.
- [LACH14c] 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.
- [LEE11] LEE, Taewon; PARK, Gunwoo; KIM, Hongseok; PARK, Inheum; LEE, KYUNGHOOON, AHN, BYOUNGSUK: The Development of the Automotive Headlamp using the DMD. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 14. München: Utz, 2011. – ISBN 3-8316-4093-9, S. 524–534.
- [MAHL05] MAHLER, Gerhard: *Die Grundlagen der Fernsehtechnik : Systemtheorie und Technik der Bildübertragung*. Berlin [u.a.]: Springer, 2005. – ISBN 3-540-21900-5.
- [MESC10] MESCHÉDE, Dieter (Hrsg.); GERTHSEN, Christian (Hrsg.): *Gerthsen Physik*. 24. Berlin: Springer-Verlag, 2010. – ISBN 978-3-642-12893-6.

- [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.
- [NEUM87] NEUMANN, J.: Notes on the photon-disequilibrium-amplification scheme (JvN), September 16, 1953. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 23 (1987), Nr. 6, S. 659–673.
- [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.
- [NEWM79] NEWMAN, William M.; SPROULL, Robert F.: *Principles of interactive computer graphics*. 2. ed. New York u.a.: McGraw-Hill Kogakusha, 1979 (McGraw-Hill computer science series).
- [NG00] NG, H. M.; MOUSTAKAS, T. D.; CHU, S. N. G.: High reflectivity and broad bandwidth AlN/GaN distributed Bragg reflectors grown by molecular-beam epitaxy. In: *Applied Physics Letters* 76 (2000), Nr. 20, S. 2818–2820.
- [PETE15] PETERSEN, A.; HAGER, Jürgen; GUT, Carsten; SEITZ, M.; SCHWAIGER, S.; SCHLÖDER, U.; HELMER, M.; BERLITZ, Stephan; NEUMANN, Cornelius; HERRING, 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.
- [POIT08] POITSCHKE, T.; ABLASSMEIER, M.; RIGOLL, G.; BARDINS, S.; KOHLBECHER, S.; SCHNEIDER, E.: Contact-analog Information Representation in an Automotive Head-up Display. In: *Proceedings of the 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. New York, NY, USA: ACM, 2008 (ETRA '08). – ISBN 978–1–59593–982–1, S. 119–122.
- [POLI14] POLIN, Dmitriij; KOSMAS, Kyriakos; KLIR, Stefan; KHANH, Tran Q.: Field studies on the flickering and stroboscopic effects of pulse-width modulated LED front lighting systems. In: SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBILE (Hrsg.): *Proceedings of the Vision 2014*, 2014.

- [REIF14] REIF, Konrad (Hrsg.): *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-658-05047-4.
- [REIM15] REIM, Johannes; OMERBEGOVIC, Said: New world of lighting based driver assistance systems – 'Good bye low beam'. 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. 131-136.
- [REIN17] REINERT-WEISS, Christiane J.; BAUR, Holger; NUSAYER, Sheikh Abdullah A.; DUHME, David; FRÜHAUF, Norbert: Development of active matrix LCD for use in high-resolution adaptive headlights. In: *Journal of the Society for Information Display* (2017). – ISSN 1938-3657.
- [REIS15] REISINGER, B; REINPRECHT, M; PÜRSTINGER, J; MOSER, A; BÖHM, G; BAUER, F: Potentials of MEMS-Based Scanners and DMD Arrays with High Luminance LED and Laser Light Sources. In: KHANH, Tran Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 16. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 473-482.
- [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.
- [ROTH16] ROTH, Joscha: *Untersuchung von elektrodynamischen Microscannern zur Darstellung von Lichtssymbolen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung*. Garbsen: TEWISS, 2016. – ISBN 978-3-95900-117-5.
- [SCHE09] SCHENK, Harald; SANDNER, Thilo; DRABE, Christian; SCHOLLES, Michael; FROMMHAGEN, Klaus; GERWIG, Christian; LAKNER, Hubert: Ultra Compact Laser Based Projectors and Imagers. In: JACKO, Julie A. (Hrsg.): *Human-Computer Interaction. Ambient, Ubiquitous and Intelligent Interaction: 13th International Conference, HCI International 2009, San Diego, CA, USA, July 19-24, 2009*,

- Proceedings, Part III.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 978-3-642-02580-8, S. 501–510.
- [SCHM04] SCHMIDT-CLAUSEN, Hans-Joachim; FREIDING, Achim: *Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr.* Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss., 2004 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen : M, Mensch und Sicherheit ; 158).
- [SCHM10] SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.); LANG, Florian (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie.* 31., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch).
- [SCHM13] SCHMIDT, Ulrich: *Professionelle Videotechnik : Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D.* Bd. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 9783642389924.
- [SCHU06] SCHUBERT, E. F.: *Light-emitting diodes.* 2nd edition. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2006. – ISBN 978-0521865388.
- [SEID92] SEIDELMANN, P. K.: *Explanatory supplement to the astronomical almanac : a revision to the Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac.* Mill Valley, Calif.: University Science Books, 1992.
- [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.
- [STIN16] STINY, Leonhard: *Aktive elektronische Bauelemente : Aufbau, Struktur, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile.* 3., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, [2016].
- [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.

- [THOR17] THORLABS INC.: *Datasheet: Longpass Dichroic Mirrors/Beamsplitters: 567 nm Cutoff Wavelength*, online verfügbar unter https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3313&pn=DMLP567T, zuletzt abgerufen am 22.02.2017, 2017.
- [TIPL15] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene; WAGNER, Jenny (Hrsg.): *Physik : für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum, 2015.
- [WALK13] WALKLING, Andreas; SCHIERZ, Christoph: Grundlegende Untersuchung zur Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern in der Straßenbeleuchtung. In: DEUTSCHE LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Licht 2012*. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG), 2013. – ISBN 978-3-927787-37-7, S. 400-404.
- [WINN12] WINNER, Hermann; WEITZEL, Alexander: Quo vadis, FAS? In: WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-8619-4, S. 658-667.
- [WOLF16a] WOLF, Alexander; KLOPPENBURG, Gerolf; DANOV, Roman; LACHMAYER, Roland: *DMD based automotive lighting unit*, Diplomarbeit, 18.05.2016.
- [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.
- [WOLF17] WOLF, Alexander: *Laserscheinwerfer für Kraftfahrzeuge: Dissertation*. Hannover: TEWISS, 2017. – ISBN 978-3-95900-015-4.
- [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.
- [YABL05] YABLON, Andrew D.: *Optical Fiber Fusion Splicing*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (Springer series in optical sciences ; 103).

- [YALC06] YALCINKAYA, A. D.; UREY, H.; BROWN, D.; MONTAGUE, T.; SPRAGUE, R.: Two-axis electromagnetic microscanner for high resolution displays. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 15 (2006), Aug, Nr. 4, S. 786–794. – ISSN 1057–7157.

Verwendete Normen und Richtlinien

- [CIE1931] 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 18.03.2017
- [DIN5034] DIN 5034: *Tageslicht in Innenräumen*. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [DIN60529] DIN EN 60529: *Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [DIN60825] DIN EN 60825: *Sicherheit von Lasereinrichtungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [DIN62471] DIN EN 62471: *Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen*. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DIN62778] DIN IEC/TR 62778: *Anwendung von IEC 62471 zur Beurteilung der Blaulichtgefahr von Lichtquellen und Leuchten (IEC/TR 62778:2012)*. Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [DIN61966] DIN EN 61966-2-1: *Multimediasysteme und -geräte - Farbmessung und Farbmanagement - Teil 2-1: Farbmanagement; Vorgabe-RGB-Farbraum, sRGB (IEC 61966-2-1:1999 + A1:2003)*. Beuth Verlag, Berlin, 2003

- [ECE8] UNECE Vehicle Regulation 8: *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing beam or a driving beam or both and equipped with halogen filament lamps (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 and/or H11)*. United Nations Economic Commission for Europe, 202
- [ECE19] UNECE Vehicle Regulation 19: *Uniform provisions concerning the approval of power-driven vehicle front fog lamps contents*. United Nations Economic Commission for Europe, 2013
- [ECE48] UNECE Vehicle Regulation 48: *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*. United Nations Economic Commission for Europe, 2014
- [ECE98] UNECE Vehicle Regulation 98: *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources*. United Nations Economic Commission for Europe, 2012
- [ECE112] UNECE Vehicle Regulation 112: *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing-beam or a driving-beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules*. United Nations Economic Commission for Europe, 2013
- [ECE119] UNECE Vehicle Regulation 119: *Uniform provisions concerning the approval of cornering lamps for power-driven vehicles*. United Nations Economic Commission for Europe, 2016
- [ECE123] UNECE Vehicle Regulation 123: *Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*. United Nations Economic Commission for Europe, 2013

Anhang

A Messergebnisse

Tabelle A.1: Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung P_{opt} vom Betriebsstrom I_{D} bei $T_{\text{case}} = 25\text{ °C}$ (blaue Diode)

Diodenstrom I_{D} in mA	Elektrische Leistung P_{el} in W	Optische Leistung P_{opt} in mW	Wirkungsgrad η in %
50	0,18	1	0,3
100	0,37	1	0,3
150	0,56	12	2,2
200	0,77	66	8,5
250	0,99	134	13,5
300	1,21	207	17,1
400	1,68	353	21,0
500	2,16	497	23,0
600	2,65	640	24,1
700	3,15	782	24,8
800	3,67	920	25,1
900	4,19	1058	25,3
1000	4,71	1192	25,3
1100	5,25	1325	25,3
1200	5,78	1463	25,3
1300	6,33	1584	25,0
1400	6,87	1691	24,6

Tabelle A.2: Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung P_{opt} vom Betriebsstrom I_D bei $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$ (grüne Diode)

Diodenstrom I_D in mA	Elektrische Leistung P_{el} in W	Optische Leistung P_{opt} in mW	Wirkungsgrad η in %
100	0,53	0	0,0
140	0,78	0	0,0
150	0,85	0,12	0,0
160	0,91	2,2	0,2
170	0,98	8,7	0,9
180	1,05	15,2	1,4
190	1,11	21,4	1,9
200	1,18	27,6	2,3
250	1,53	56,8	3,7
300	1,88	77,8	4,1
340	2,16	92,7	4,3
350	2,23	100,8	4,5
400	2,58	129,7	5,0
430	2,79	142,6	5,1
440	2,87	146,6	5,1
450	2,94	150,4	5,1
460	30,1	154	0,5
470	3,08	157,2	5,1
480	3,14	160,1	5,1

Tabelle A.3: Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung P_{opt} vom Betriebsstrom I_D bei $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$ (rote Diode)

Diodenstrom I_D in mA	Optische Leistung P_{opt} in mW
0	0,07
50	0,07
100	0,92
150	1,76
200	3,45
250	35,24
300	91,97
350	148,48
400	207,12
450	264,13
500	320,37
550	375,76
600	430,80
650	484,07
700	536,22
750	586,68
800	633,76

Tabelle A.4: Thermische Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung der Dioden bei gegebenen Betriebsströmen (rote und grüne Diode)

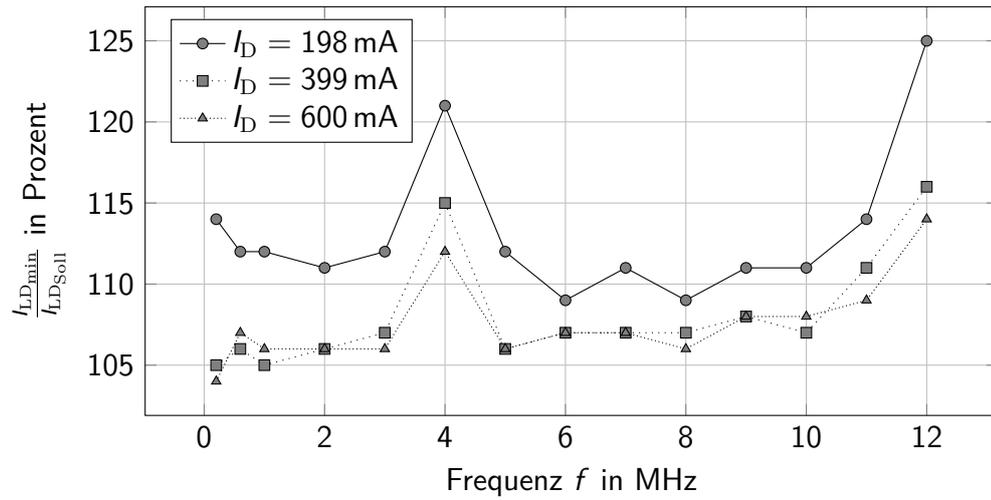
T_{case} in °C	Laserleistung in mW					
	rot (ADL63v0-BTP)			grün (PLP520)		
	Betriebsstrom $I_D =$			Betriebsstrom $I_D =$		
	250 mA	400 mA	600 mA	150 mA	300 mA	450 mA
20,0	58,8	208,0	401,6	47,5	155,4	244,4
21,0	55,0	202,6	394,8	47,0	154,9	243,4
22,0	51,4	197,3	388,0	46,4	154,4	242,4
23,0	47,7	191,8	380,7	45,7	153,9	241,5
24,0	43,8	185,9	373,1	45,0	153,2	240,5
25,0	39,7	179,8	365,3	44,3	152,6	239,5
25,5	38,1	176,5	361,1	44,0	152,3	239,0
26,0	35,6	173,2	356,9	43,6	152,0	238,5
26,5	33,5	169,9	352,6	43,3	151,6	238,0
27,0	31,6	166,5	348,3	42,9	151,3	237,4
27,5	29,9	163,1	343,9	42,5	150,9	236,9
28,0	28,3	159,6	339,4	42,1	150,6	236,4
28,5	26,8	156,1	335,0	41,7	150,3	235,8
29,0	25,2	152,6	330,3	41,3	149,9	235,3
29,5	23,8	148,9	325,7	41,0	149,6	234,7
30,0	22,4	145,3	320,9	40,6	149,3	234,2
30,5				40,2	148,8	233,6
31,0				39,7	148,4	233,0
31,5				39,3	148,1	232,4
32,0				38,9	147,7	231,9
32,5				38,5	147,2	231,4
33,0				38,0	146,8	230,8
33,5				37,6	146,4	230,1
34,0				37,1	145,9	229,6
34,5				36,6	145,4	229,0
35,0				36,2	144,9	228,4

Tabelle A.5: Thermische Abhängigkeit der optischen Ausgangsleistung der Dioden bei gegebenen Betriebsströmen (blaue Diode)

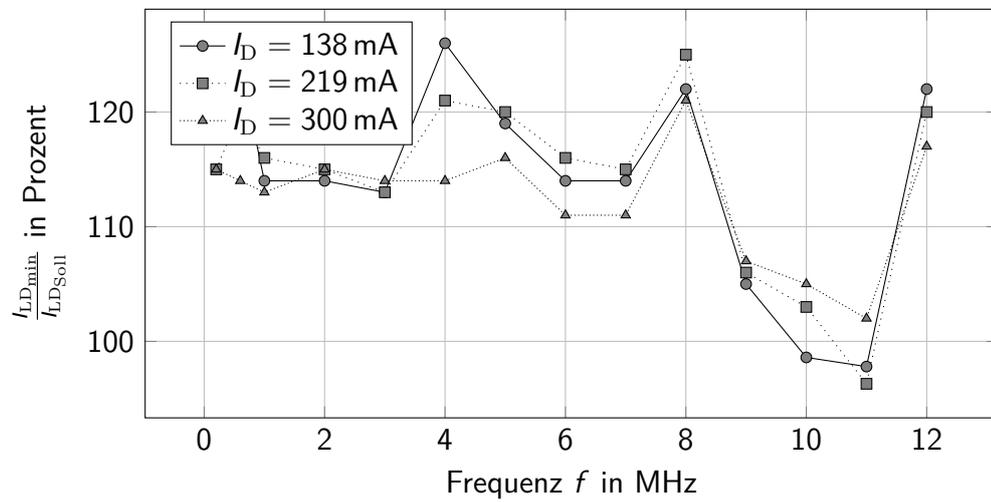
T_{case} in °C	Laserleistung in mW blau (PL-TB450B)			
	$I_D = 180$ mA	$I_D = 300$ mA	$I_D = 500$ mA	$I_D = 700$ mA
20,0	40,3	213,4	515,8	810,8
21,0	38,2	210,6	512,6	807,0
22,0	36,0	207,8	509,1	803,1
23,0	33,7	204,7	505,7	799,1
24,0	31,5	201,9	502,4	795,1
25,0	29,2	199,1	498,8	791,5
25,5	28,0	197,4	497,0	789,5
26,0	26,8	196,0	496,3	787,5
26,5	25,6	194,4	494,7	785,7
27,0	24,3	192,8	492,6	783,5
27,5	23,2	191,3	491,0	781,9
28,0	21,9	189,7	489,1	779,5
28,5	20,6	188,1	487,2	777,0
29,0	19,4	186,5	485,5	775,0
29,5	18,1	185,0	483,6	773,1
30,0	16,7	183,2	481,6	770,8
30,5	15,2	180,9	478,9	767,0
31,0	14,3	179,9	477,8	765,9
31,5	13,0	178,3	476,2	764,0
32,0	11,9	176,6	474,4	761,4
32,5	10,7	174,7	472,2	759,0
33,0	9,7	173,1	470,4	756,9
33,5	8,6	171,4	468,5	754,3
34,0	7,5	169,7	466,5	751,9
34,5	6,5	167,9	464,7	749,3
35,0	5,4	165,8	462,4	746,5

Tabelle A.6: Leistungsabhängige Strahlprofile an der Position des Mikrospiegels für die Laser einzeln und als Strahlkombination

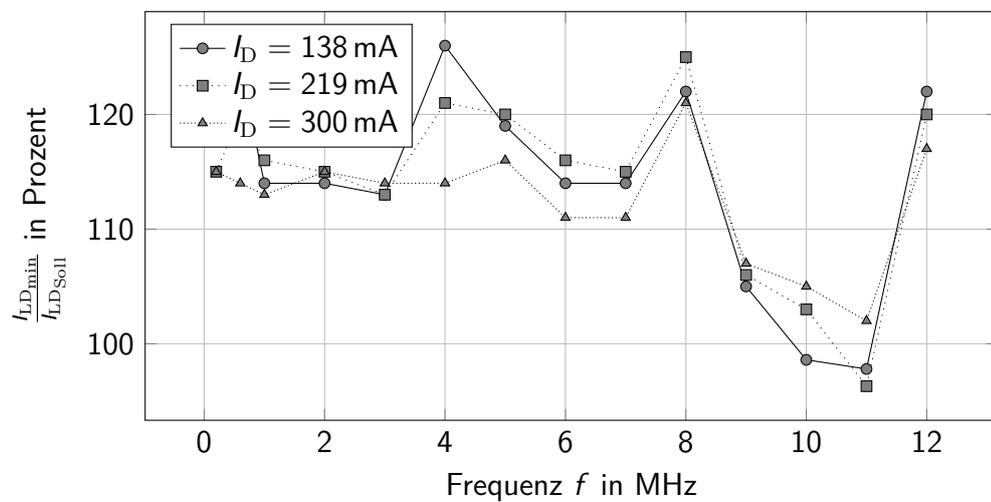
Laser- diode	I_D in mA	T_{case} in °C	P_{opt} in mW	$D4\sigma_x$ in μm	$D4\sigma_y$ in μm	Fläche in μm^2
Blau	516	29,7	471,1	428,9	753,3	323090
	180	27,1	35,1	391,7	741,4	290406
	300	28,0	176,4	402,7	770,5	310280
	500	29,1	442,6	425,5	750,9	319508
	800	31,2	814,0	448,5	698	313053
Grün	241	27,7	50,4	955,1	682,6	651951
	150	27,2	8,8	937,2	667,7	625768
	300	28,9	77,8	964,8	672,6	648924
	450	30,4	137,0	974,9	678,1	661080
Rot	570	29,1	240,0	766,7	668,6	512616
	200	27,7	1,2	875,1	2535	2218379
	249	28,5	9,6	751,7	770,2	578959
	399	29,7	127,2	745,8	627,8	468213
	600	30,8	276,0	772,1	680,1	525105
RGB				902,6	776,7	701049



A Rote Diode

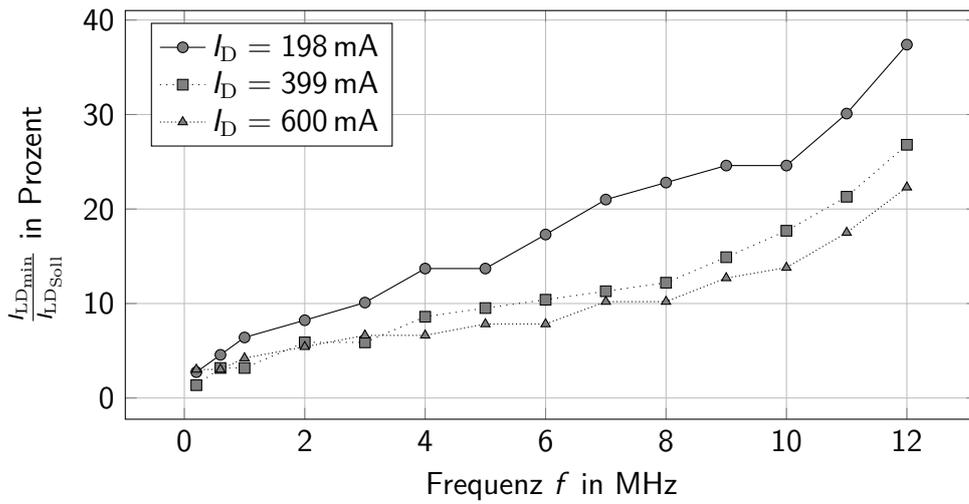


B Grüne Diode

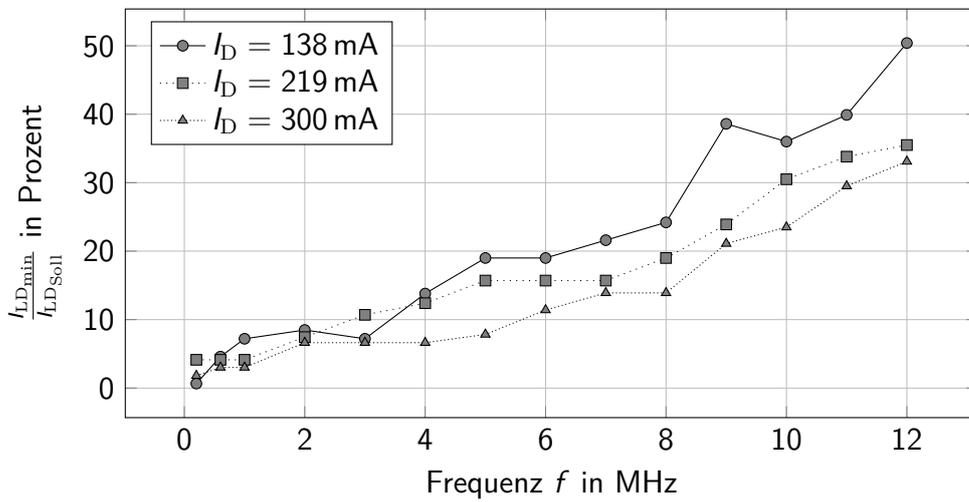


C Blaue Diode

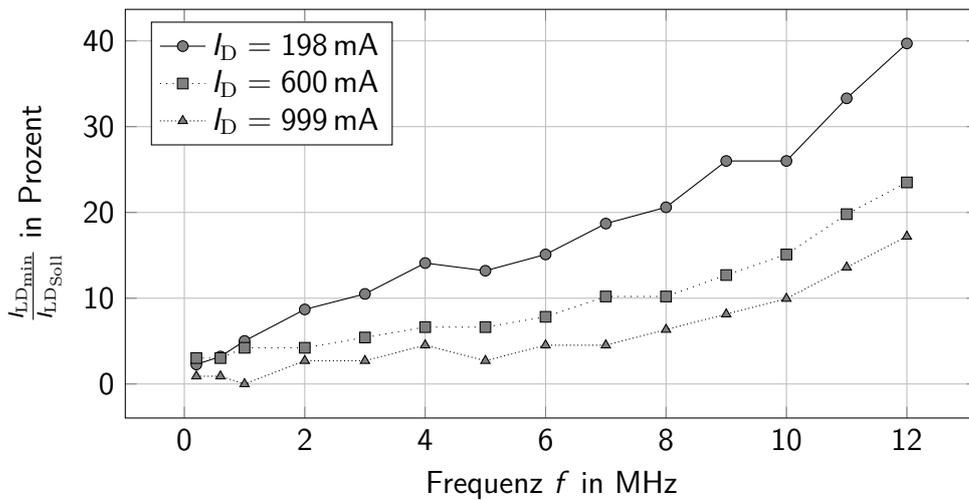
Abbildung A.1: Frequenzabhängiges Verhältnis von maximalem Diodenstrom zur Stromvorgabe I_D



A Rote Diode



B Grüne Diode



C Blaue Diode

Abbildung A.2: Frequenzabhängiges Verhältnis von minimalem Diodenstrom zur Stromvorgabe I_D

B Betreute studentische Arbeiten

Tabelle B.1: Übersicht betreuter studentischer Arbeiten

Name	Titel der Arbeit
Duderstadt, Martin	Aufbau und Simulation eines Modells für die Strahlkombination von RGB-Laserdioden zur Erzeugung einer Weißlichtquelle
Haese, Magnus	Simulation strahlungserzeugter Temperatur-Hot-Spots mit THESEUS-FE am Beispiel eines Golf Plus Scheinwerfers
Johannknecht, Florian	Rechnergestützte Auslegung eines optischen Systems zur Erzeugung einer Scheinwerferlichtverteilung mit Laserdioden
Kahlert, Fabian	Auslegung und Aufbau eines Zusatzfernlichts basierend auf Laserdioden
Kipkeew, Lorenz	Analyse der technischen Möglichkeiten zur Gestaltung eines Super-Effizienz-Transporters
Kliever, Wilhelm	Auslegung einer Ansteuerung für ein dynamisches Laserprojektionsystem
Kreuz, Marian	Sensorkonzepte für autonome Fahrzeuge
Niemeier, Marius	Entwicklung und Konstruktion eines Diodenlasers mit Frequenzstabilisierung als Einschubmodul für ein 19 Zoll Rack System
Petersmann, Thomas	Entwicklung und Validierung eines laserbasierten Lichtmoduls zur dynamischen Bilderzeugung

Name	Titel der Arbeit
Petersmann, Thomas	Dekompositionierung eines Voll-LED Scheinwerfers und Inbetriebnahme der Einzelfunktionen
Petersmann, Thomas	Untersuchung des zeitlichen Verhaltens von drei Lasermodulen des Typs Messtec Fast Modulator VFM 1,5-25
Pyttlik, Daniel	Ansteuerung eines RGB-Laserscanners zur Projektion von Fahrerassistenzfunktionen
Rosellen, Franziska	Fahrzeugumfeldbeleuchtung: Parallel & Welcome Light
Schneider, Tim	Ansteuerung und Aufbau eines Laserdioden-Moduls
Wittekind, Max	Aufbau einer Entwicklungsumgebung für dynamisch ausblendende Fahrzeugscheinwerfer

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Gerolf Ekkehard Konrad Kloppenburg
Geburtsdatum 15. August 1984
Geburtsort Göttingen

Akademischer Werdegang

seit 2012 Doktorand an der Fakultät für Maschinenbau der
Leibniz Universität Hannover
2006 - 2011 Maschinenbaustudium an der Leibniz Universität Hannover
Vertiefung: Fahrzeugsysteme / Mechanik & Konstruktion
Abschluss: Diplomingenieur
2004 - 2006 Physikstudium an der Ruprecht-Karls-Universität
Heidelberg

Zivildienst

2003 - 2004 Universitätsklinikum Göttingen

Schulbildung

1996 - 2003 Max-Planck-Gymnasium Göttingen
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Beruflicher Werdegang

seit 2014 Gruppenleiter der Arbeitsgruppe Optomechatronik
am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau
seit 2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktent-
wicklung und Gerätebau (IPeG) der Leibniz Universität
Hannover in der Arbeitsgruppe Optomechatronik
2011 Praktikum bei Voith Turbo GmbH & Co. KG
in der Vorentwicklung Busgetriebe