

# LASERBASIERTE HOCHAUFLÖSENDE PIXELLICHTSYSTEME

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Carsten Gut

Geb. in

Überlingen

Tag der mündlichen Prüfung: 07. Februar 2017

Hauptreferent:

Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek



---

## I DANKSAGUNG

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Licht und Sicht der Audi AG. Während dieser Zeit erhielt ich Unterstützung von vielen Personen, jedoch möchte ich meinen Dank im Rahmen dieser Arbeit insbesondere folgenden Menschen aussprechen:

Mein besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann, der mich bei der Erstellung dieser Arbeit immer fachlich und moralisch unterstützte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek danke ich für die Übernahme des Korreferats und der kritischen Durchsicht der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Vorgesetzten Stephan Berlitz und Dr. Ing. Wolfgang Huhn für das entgegengebrachte Vertrauen und die fachlichen Hinweise, welche in diese Arbeit mit eingeflossen sind.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei den Kollegen der OTIA Arbeitsgruppe für die vielen aufschlussreichen fachlichen Diskussionen.

Weiterhin möchte ich mich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Projektpartnern bedanken, denn Teile dieser Arbeit sind im Rahmen des Förderprojekts „iLaS“ entstanden.

Zuletzt gilt mein Dank auch meinen Kollegen und studentischen Mitarbeitern die mich durch ihre Mitarbeit unterstützt haben.

Carsten Gut

---

---

## II INHALTSVERZEICHNIS

<b>I</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.1.1	Laserbasierte Weißlichtquellen .....	1
1.1.2	Pixellichtsysteme .....	2
1.2	Zielstellung der Arbeit.....	5
1.3	Struktureller Aufbau.....	5
<b>2</b>	<b>Potentialanalyse</b> .....	<b>7</b>
2.1	Laserbasierte Weißlichtquelle.....	7
2.2	Pixellichtsysteme .....	12
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>17</b>
3.1	Laserbasierte Weißlichtquelle.....	17
3.1.1	Fluoreszenzkonversion.....	19
3.1.2	RGB-Farbmischung .....	21
3.1.3	Patentübersicht .....	22
3.2	Pixellichtsysteme .....	26
3.2.1	Strahlgeführte Systeme.....	28
3.2.2	Flächenmodulierte Systeme .....	31
3.2.2.1	LED Array .....	31

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

3.2.2.2	LCD.....	34
3.2.2.3	DMD .....	35
3.2.3	Patentübersicht .....	37
<b>4</b>	<b>Konzeptvergleich .....</b>	<b>45</b>
4.1	Technologie Benchmark.....	45
4.2	Leistungsabschätzung .....	49
4.2.1	Strahlgeführter Ansatz.....	62
4.2.1.1	Resonant 2D Betrieb .....	64
4.2.1.2	Quasistatischer 2D Betrieb.....	68
4.2.1.3	Resonant/Quasistatischer Betrieb .....	70
4.2.2	Flächenmodulierter Ansatz .....	72
4.3	Diskussion und Technologieauswahl .....	74
<b>5</b>	<b>Eingrenzung der Parameter.....</b>	<b>79</b>
5.1	Gesetzliche Anforderungen .....	79
5.2	Lichtfunktionen.....	82
5.2.1	Adaptive Abblendlichtfunktionen .....	83
5.2.2	Adaptive Fernlichtfunktionen .....	86
5.3	Öffnungswinkel .....	87
5.3.1	Verkehrsraumanalyse .....	88
5.3.2	Ausleuchtüberlappung .....	90
5.3.3	Vertikaler Öffnungswinkel.....	93
5.3.4	Horizontaler Öffnungswinkel.....	100
5.3.4.1	Abblendlichtbereich .....	100

## Inhaltsverzeichnis

---

5.3.4.2	Fernlichtbereich .....	110
5.3.5	Diskussion und Ergebnisse .....	113
5.4	Auflösung .....	116
5.4.1	Adaptive Abblendlichtfunktionen .....	116
5.4.2	Adaptive Fernlichtfunktionen .....	117
5.5	Kontrast .....	119
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchung .....</b>	<b>123</b>
6.1	Einleitung .....	123
6.2	Theorie .....	124
6.2.1	Flimmern .....	125
6.2.2	Stroboskopeffekt .....	126
6.2.3	Perlschnureffekt .....	127
6.3	Hypothesen .....	127
6.4	Versuchsdesign .....	129
6.4.1	Versuchsträger .....	129
6.4.2	Ansteuerung .....	131
6.4.3	Teststrecke .....	131
6.4.4	Messdaten Aufnahme .....	132
6.4.5	Versuchsablauf .....	133
6.4.6	Probandenkollektiv .....	137
6.5	Analyse der Daten .....	139
6.5.1	Datenfilterung .....	139
6.5.2	Statistische Verfahren .....	140
6.5.3	Deskriptive Statistik .....	142

---

## Inhaltsverzeichnis

---

6.6	Diskussion .....	151
<b>7</b>	<b>Modellbasierte Auslegung.....</b>	<b>153</b>
7.1	Lichtverteilung.....	153
7.2	Konverter Spotgröße .....	157
7.3	Einblendauflösung .....	159
7.4	Mikrospiegelansteuerung.....	163
7.5	Homogenitätsbetrachtung.....	165
7.6	Lichtstrommatrix .....	166
7.7	Aufenthaltszeitmatrix .....	168
7.8	Leistungsberechnung .....	177
7.8.1	Linearer Mikrospiegelbetrieb.....	179
7.8.2	Optimierter Mikrospiegelbetrieb.....	185
7.9	Diskussion der Ergebnisse.....	191
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>193</b>
8.1	Zusammenfassung .....	193
8.2	Ausblick .....	198
<b>III</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>202</b>
<b>IV</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>228</b>
<b>V</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>239</b>
<b>VI</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>243</b>
	Anhang A: Abkürzungen, Symbole und Einheiten .....	243
	A.1 Abkürzungen.....	243
	A.2 Symbole und Einheiten .....	244

## Inhaltsverzeichnis

---

Anhang B: Dimensionen und Winkel .....	252
B.1 Standardstraße und Standardfahrzeug .....	252
B.2 Winkelbezeichnungen.....	254
Anhang C: Experimentelle Untersuchung.....	256
C.1 Fragebögen .....	256
C.2 Ablaufreihenfolge.....	258
Anhang D: Veröffentlichungen .....	260
D.1 Konferenzbeiträge .....	260
D.2 Zeitschriften und Journals.....	262
D.3 Patentschriften .....	262
Anhang E: Betreute Studentische Arbeiten.....	265



---

## **Kapitel 1**

# **EINLEITUNG**

### **1.1 MOTIVATION**

Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme gehören zu den spannendsten Feldern der automobilen Elektrotechnik, da sie ganz neue Sicherheitsstandards und Einsatzformen in der automobilen Nutzung eröffnen, vielfältige Anwendungsbereiche ermöglichen und darüber hinaus die Sicherheit beim Fahren nachhaltig verbessern. Im Folgenden werden diese Punkte präzisiert, um die Motivation für das Thema dieser Dissertation zu erläutern.

#### **1.1.1 LASERBASIERTE WEIßLICHTQUELLEN**

Laserlichtquellen haben besondere Eigenschaften. Die Kohärenz führt dazu, dass sich eine Laserlichtquelle besonders gut fokussieren lässt. Diese Eigenschaft wird im Automobil derzeit eingesetzt, um die Leuchtdichte auf einem Konverter gegenüber der LED Technologie zu erhöhen. Dies ist möglich, da die Leuchtdichte durch die optische Leistung und die Anzahl an Laserstrahlen, die auf einen Punkt auf dem Konverter treffen, skalierbar ist. Derzeit

---

werden Laserlichtquellen im Kraftfahrzeug verwendet, um die Reichweite des Fernlichts zu vergrößern. Durch die hohe Leuchtdichte ist eine Reichweitenerhöhung auch möglich, ohne dass die Optikfläche vergrößert werden muss. Durch den kleineren Bauraum ergeben sich Freiheitsgrade im Design.

Laserbasierte Weißlichtquellen sind nicht nur für statische Lichtverteilungen geeignet, sondern sie können auch als Lichtquelle gezielt für Pixellichtsysteme verwendet werden. Hierbei sind zwei Fakten entscheidend: Zum einen lässt sich ein Laserstrahl durch kleine Spiegel ablenken und zum anderen bietet die hohe Leuchtdichte die Möglichkeit effizient einen Bildgeber auszuleuchten.

### 1.1.2 PIXELLICHTSYSTEME

Die visuelle Wahrnehmung bei Nacht ist beim Menschen durch die Dunkelheit stark eingeschränkt. Dadurch ergeben sich visuelle Defizite, die auch im Kapitel Potentialanalyse umfassend untersucht werden. An dieser Stelle ist erwähnenswert, dass durch fehlendes Licht oder eine inkorrekte Ausleuchtung, beispielsweise Kurvenradien oder Entfernungen, anders beziehungsweise falsch eingeschätzt werden. Außerdem sind Gefahrenstellen nicht frühzeitig erkennbar oder Objekte auf der Fahrspur werden zu spät erkannt. Zusätzlich fällt Fahrzeugführern die Orientierung und die Navigation bei Nacht deutlich schwerer. Daher ist das Bestreben der modernen Scheinwerferentwicklung diese Defizite zu kompensie-

ren. In den letzten Jahren wurden zahlreiche neue Technologien in diesem Bereich auf den Markt gebracht, wobei die Matrix LED Technologie die flexibelste Art zur Erzeugung von Lichtverteilungen darstellt. Die dynamische Anpassung der Lichtverteilung ermöglicht es, jedes Lichtsegment in seiner Helligkeit zu steuern. Somit kann der Gegenverkehr entblendet werden, ohne das Fernlicht komplett zu deaktivieren. Die Auflösung ist derzeit jedoch auf weniger als 100 Pixel pro Scheinwerfer beschränkt.

Aufgrund einer höheren Auflösung der laserbasierten Pixellichttechnologien kann die Lichtverteilung zukünftig präziser an die jeweiligen Parameter angepasst werden. Dadurch sind die visuellen Defizite teilweise kompensierbar. Darüber hinaus sind vollkommen neue Lichtfunktionen denkbar. Hier können beispielsweise eine perspektivische Verzerrungskorrektur von Lichtverteilungen oder die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern genannt werden.

Doch das größte Potential von hochauflösenden Scheinwerfern liegt in der per Software anpassbaren Lichtverteilung. Diese ist zukünftig nicht nur durch die verwendeten optischen Elemente und deren lichttechnische Auslegung beschränkt, sondern kann den Anforderungen entsprechend programmiert werden. Des Weiteren ist der Gradient zwischen der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) durch Softwareparameter individuell anpassbar, sofern das Gesamtsystem dies zulässt. Zusätzlich kann eine mechanikfreie Leuchtweitenregelung (LWR) umgesetzt werden. Diese kann schneller reagieren und ist individuell einstellbar.

Die softwarebasierte Technik erlaubt außerdem weitere Individualisierungen und Anpassungen. So kann der Fahrzeugführer, im Rahmen der gesetzlichen Möglichkeiten, die Lichtverteilung seines Fahrzeugs nach seinen Bedürfnisse konfigurieren [GUT13a]. Unter dem Aspekt der Zulassung könnte zukünftig die Lichtverteilung, ohne Änderung der Hardware, per Software an die gesetzlichen Anforderungen für mehrere Ländervarianten angepasst werden. Neu entwickelte innovative Lichtfunktionen sind zukünftig per Datenübertragung nachladbar.

Eine der zukunftsweisendsten Innovationen in der Automobiltechnik ist das autonome Fahren. Hier sind an die Technik gänzlich neue Anforderungen gestellt, da sie zum Teil menschliche Funktionen ersetzen muss. So ist es möglich durch Lichtfunktionen den fehlenden Augenkontakt bei einem autonomen Fahrzeug zu kompensieren oder sogar zu verbessern, indem gezielte Projektionen auf der Straße als Kommunikations- und Interaktionsmittel verwendet werden. Durch Licht ist eine klare Adressierung der jeweiligen anderen Verkehrsteilnehmer möglich.

Diese digitalen Möglichkeiten werden letztendlich auch Arbeitsfelder neu definieren. Es ist gut möglich, dass die Kompetenz innerhalb der Lichtentwicklung vom Hardware Ingenieur zum Software Ingenieur verschoben wird.

## **1.2 ZIELSTELLUNG DER ARBEIT**

Die in dieser Arbeit beschriebenen Lichtfunktionen sind durch eine Verbindung der Fahrzeugsensorik mit der hochauflösenden Lichttechnik realisierbar. In dieser Arbeit dient dazu erstmalig ein strahlgeführtes System, welches unter Berücksichtigung der optischen Eigenschaften der Lasertechnologie substantiell untersucht wird. Hierzu werden experimentelle Studien hinsichtlich des Flimmerns im dynamischen Fahrzeugumfeld durchgeführt. Außerdem werden mathematische Modelle zur Bestimmung der optischen Parameter für ein laserbasiertes Pixellichtsystem entworfen. Ein Ziel der Arbeit ist darüber hinaus eine geeignete Technologie unter Berücksichtigung von Effizienz und Nutzungsrate zu ermitteln und durch eine präzise Ansteuerung die benötigte optische Leistung zu reduzieren.

## **1.3 STRUKTURELLER AUFBAU**

Zunächst wird im Kapitel „Potentialanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme“ das Potential für die laserbasierte Weißlichtquelle und für die Pixellichtsysteme im Detail untersucht. Im anschließenden Kapitel wird der Stand der Technik ermittelt und basierend auf den sich daraus ergebenden Erkenntnissen wird ein Technologievergleich durchgeführt, bei dem unter anderem die Effizienz und die Nutzungsrate analysiert wird. In der Folge ist der Parameterraum einzugrenzen, so dass mit einer sinnvollen optischen Leistung

gearbeitet werden kann. Des Weiteren wird im Rahmen einer experimentellen Untersuchung die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern untersucht.

---

## Kapitel 2

# POTENTIALANALYSE

Im Folgenden soll das Potential dieser neuartigen Technologie aufgezeigt werden. Dabei sind die Laserlichtquellen und die Pixellichtsysteme einzeln zu betrachten.

### 2.1 LASERBASIERTE WEIßLICHTQUELLE

Ein Vorteil von laserbasierten Weißlichtquellen ist, dass der Konverter örtlich von der Lichterzeugung getrennt werden kann, was auch als „Remote Konverter“ bezeichnet wird [KAU14]. Dadurch ist der Konverter thermisch vom lichterzeugenden Halbleiter entkoppelt und es sind höhere Leuchtdichten realisierbar, da im Konverter nur die thermischen Konversionsverluste abzuführen sind.

Das größte Potential von laserbasierten Weißlichtquellen liegt jedoch in der hohen Leuchtdichte. Sie ergibt sich zum einen aufgrund der Fokussierbarkeit eines Laserstrahls sowie durch das Hinzufügen von weiteren Laserlichtquellen, wodurch die Leuchtdichte skalierbar ist.

---

Die Leuchtdichte ist deshalb so entscheidend, da sich aus dieser die sogenannte "Etendue" berechnet. Das bedeutet, dass mit einer hohen Leuchtdichte die Etendue der Lichtquelle kleiner wird. Mit einer kleineren Etendue können kleinere Optiken effizienter das Licht in kleinere Raumwinkel bündeln. Dabei gilt, dass die Etendue durch ein optisches System nie verkleinert werden kann, sondern nur vergrößert wird. Somit ist die größte Etendue in einem optischen System der limitierende Faktor für die Effizienz. Außerdem ist der Kontrast eines auf der „Digital Micromirror Device“ (DMD) Technologie basierenden Scheinwerfers, welcher im späteren Verlauf vorgestellt wird, bei gleicher Effizienz durch eine hohe Leuchtdichte vergrößerbar [GUT14b], [BHA15]. Des Weiteren können, wie schon von Berlitz [BER14b] und Reisinger [REI15b] beschrieben, durch die hohen Leuchtdichten kleinere, effizientere und damit kostengünstigere Bildgeber in Form von DMDs und "Liquid-Crystal Displays" (LCDs) verwendet werden.

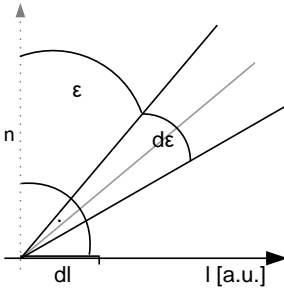
Um das Potential der Leuchtdichte zu verdeutlichen sind im Folgenden die formalen Zusammenhänge zwischen Leuchtdichte, der Größe der Optik und der Auflösung und Etendue dargestellt. Die Herleitung der Gleichungen erfolgt zunächst für die zweidimensionale Etendue. Darauf aufbauend wird die dreidimensionale Etendue hergeleitet.

Die Berechnung der zweidimensionalen Etendue  $G_{2D}$  einer Lichtquelle oder eines optischen Systems kann auf Basis von den Arbeiten von Chaves [CHA16] und Gut [GUT14b], gemäß Gleichung (2.1), erfolgen.

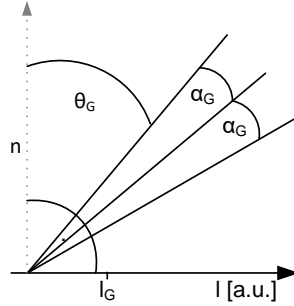


$$d^2G_{2D} = n_B \cdot dl \cdot \cos \epsilon \cdot d\epsilon \quad (2.1)$$

Der Faktor  $n_B$  beschreibt hierbei den Brechungsindex und  $l$  die Ausdehnung der Lichtquelle. Die Winkelbezeichnungen und Integrationsgrenzen sind der Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 entnehmbar.



**Abbildung 2.1:** Darstellung der Winkel zur Berechnung der zweidimensionalen Etendue.



**Abbildung 2.2:** Integrationsgrenzen zur Berechnung der zweidimensionalen Etendue.

Mit den in der Abbildung dargestellten Integrationsgrenzen kann die Gleichung (2.2) zur Berechnung der zweidimensionalen Etendue hergeleitet werden.

$$\begin{aligned} G_{2D} &= \iint n_B dl \cos \epsilon d\epsilon = n_B \int dl \int_{\theta_G - \alpha_G}^{\theta_G + \alpha_G} \cos \epsilon d\epsilon \\ &= n_B \int_0^{l_G} dl \cdot \int_{\theta_G - \alpha_G}^{\theta_G + \alpha_G} \cos \epsilon d\epsilon \end{aligned} \quad (2.2)$$

Nach Integration und einsetzen der Integrationsgrenzen ergibt sich die Gleichung (2.3).

$$G_{2D} = n_B(l_G - 0) \cdot [\sin(\theta_G + \alpha_G) - \sin(\theta_G - \alpha_G)] \quad (2.3)$$

Mit dem Additionstheorem kann die Gleichung (2.3) in Gleichung (2.4) umgestellt werden:

$$G_{2D} = n_B \cdot l_G (\sin(\theta_G)\cos(\alpha_G) + \cos(\theta_G)\sin(\alpha_G) - \sin(\theta_G)\cos(\alpha_G) + \cos(\theta_G)\sin(\alpha_G)) \quad (2.4)$$

Die anschließende Vereinfachung ergibt Gleichung (2.5).

$$G_{2D} = n_B \cdot 2l_G (\cos(\theta_G)\sin(\alpha_G)) \quad (2.5)$$

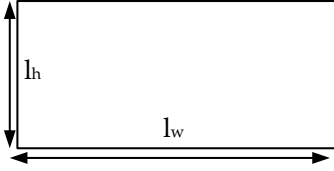
Wird die Etendue innerhalb eines Systems betrachtet, so kann der Faktor zwei weggelassen werden, da sich dieser aus den Gleichungen heraus kürzt.

Die dreidimensionale Etendue, bei der die Fläche einer Lichtquelle mit berücksichtigt wird, ist gemäß der Ausarbeitung von Bhakta [BHA15] aus einer zweidimensionalen Etendue berechenbar. In Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 sind die Längenangaben einer rechteckigen und elliptischen Fläche zu sehen.

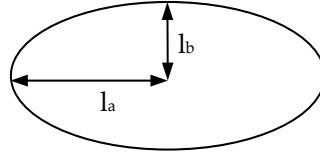
Zunächst ist die zweidimensionale Etendue nach Formel (2.5) zu berechnen. Daraus ergeben sich die Gleichung (2.6) und (2.7) für die zweidimensionale Etendue in w und h-Richtung.

$$G_w = n_B \cdot l_w \cos(\theta_{Gw}) \cdot \sin(\alpha_{Gw}) \quad (2.6)$$

$$G_h = n_B \cdot l_h \cos(\theta_{Gh}) \cdot \sin(\alpha_{Gh}) \quad (2.7)$$



**Abbildung 2.3:** Längenangaben zur Berechnung der dreidimensionalen Etendue eines Rechtecks.



**Abbildung 2.4:** Längenangaben zur Berechnung der dreidimensionalen Etendue einer Ellipse.

Der Faktor  $\cos(\theta_{Gw})$  gibt die Verkippung der Fläche in w-Richtung und der Faktor  $\cos(\theta_{Gh})$  die Verkippung der Fläche in h Richtung an. Gemäß Bhakta [BHA15] kann die dreidimensionale Etendue durch Multiplizieren der zweidimensionalen Etendue berechnet werden. Die dreidimensionale Etendue eines Rechtecks ergibt sich somit aus Gleichung (2.8).

$$G_{3D} = n_B^2 \cdot l_w \cos(\theta_{Gw}) \cdot \sin(\alpha_{Gw}) \cdot l_h \cos(\theta_{Gh}) \cdot \sin(\alpha_{Gh}) \quad (2.8)$$

Die dreidimensionale Etendue einer Ellipse berechnet sich gemäß Gleichung (2.9).

$$G_{3D} = \pi \cdot n_B^2 \cdot l_a \cos(\theta_{Ga}) \cdot \sin(\alpha_{Ga}) \cdot l_b \cos(\theta_{Gb}) \cdot \sin(\alpha_{Gb}) \quad (2.9)$$

Mit obigen Formeln kann die Etendue für die Lichtquelle und das optische Element berechnet werden. Damit innerhalb eines optischen Systems keine Etendueverluste auftreten, muss gemäß Gleichung (2.10) die Etendue der Lichtquelle  $G_{Quelle}$  kleiner oder gleich der Etendue des optischen Elements  $G_{Optik}$  sein.

$$G_{Quelle} \leq G_{Optik} \quad (2.10)$$

## 2.2 PIXELLICHTSYSTEME

Um das Potential eines Pixellichtsystems aufzeigen zu können, müssen zunächst die Defizite, welche durch die eingeschränkte visuelle Wahrnehmung bei Nacht auftreten, diskutiert werden.

Neueste Befragungen hinsichtlich Verkehrssicherheit ergeben, dass Fahrten bei extremen Wetterbedingungen, bei Nacht und durch Baustellen den Fahrzeugführern die meisten Schwierigkeiten bereiten [JAE15].

Nach Leibowitz [LEI77] sind das foveale und periphere Sehen für verschiedene Aufgaben beim Fahren zuständig, welche jedoch bei geringerer Helligkeit unterschiedlich degradieren. Das foveale Sehen dient der Objekt- und Hinderniserkennung. Es wird bei Dunkelheit stärker beeinflusst, als das periphere Sehen, welches für die räumliche Orientierung und die Aufmerksamkeitssteuerung mitverantwortlich ist. Durch die Degradation des fovealen Sehens, nehmen das Auflösungsvermögen, die Kontrastempfindlichkeit und das Stereosehen signifikant ab. Dadurch wird die Erkennung von Objekten sowie von Fußgängern und Fahrradfahrern erschwert.

Für die Entfernungseinschätzung ist das sogenannte "Tiefensehen" von hoher Bedeutung [SCH12]. Da das Stereosehen bei Dunkelheit beeinträchtigt wird, haben Fahrzeugführer Schwierigkeiten Entfernungen und Anhaltewege richtig einzuschätzen [BÖH12], wodurch oftmals der Sicherheitsabstand nicht eingehalten wird [LEI98].

Cohen [COH87] und Hristov [HRI09] stellten fest, dass das periphere Sehen zur Spurhaltung in Kurven nicht ausreichend ist. Das würde auch erklären, weshalb der Fahrer in Kurven bei Nacht nachweislich einer höheren Belastung ausgesetzt ist. In verschiedenen Studien, die unabhängig von dieser Arbeit durchgeführt wurden [GUT11] [COH09] zeigt sich, dass sich mit kleiner werdenden Kurvenradien die fovealen Fixationen vom Kurvenscheitelpunkt hin zum Fluchtpunkt verschoben wird. Jedoch empfiehlt Schweigert [SCH03b] das Fixieren des Kurvenscheitelpunkts, da nur an diesem die Kurvenkrümmung abgelesen werden kann. Eine Schlussfolgerung daraus ist, dass "die Fixation des Fluchtpunktes [...] ein möglicher Grund für das Abkommen des Fahrzeugs vom Fahrstreifen sein [könnte]. Da dies insbesondere bei kleinen Kurvenradien der Fall ist, könnte das [, neben einer nicht angepassten Geschwindigkeit,] der Grund dafür sein, dass sich die Unfallrate in kleinen Kurven signifikant erhöht" [GUT11]. Auch nach Hoffmann [HOF03] ist das Unfallrisiko in Kurven höher als auf geradem Streckenverlauf. Des Weiteren steigt die Unfallwahrscheinlichkeit bei Nacht mit kleinerem Kurvenradius [HOF01].

Die Defizite sind somit bekannt. Durch die Einführung des ersten Pixellichtsystems, dem Matrix LED Scheinwerfer, konnte bereits die Sichtbarkeit von Objekten im Fahrzeugumfeld verbessert werden. Austerschulte [AUS13] untersuchte verschiedene Matrix Beam Konfigurationen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Segmenten. Seine Ergebnisse zeigen, dass eine höhere Auflösung der Fernlichtverteilung den Nutzungsgrad weiter erhöht und somit die

Fahrsicherheit verbessert wird. Der Grund hierfür ist, dass bei einem Matrix LED System im Mittel bis zu 33 % mehr Lichtstrom oberhalb der HDG ist im Vergleich zu einem konventionellen Fernlicht. Austerschulte zeigte, dass durch eine höhere Anzahl an Segmenten der Nutzungsgrad des blendfreien Fernlichts gesteigert werden kann.

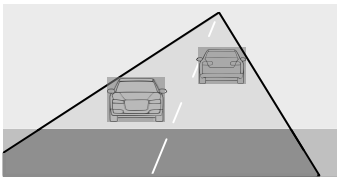
Der Einfluss unterschiedlicher vertikaler Auflösungen eines Matrix LED Scheinwerfers auf die Erkennbarkeitsentfernung wurden von Michel [MIC14a] in einer Probandenstudie untersucht. Verglichen wurde eine einzeilige mit einer vierzeiligen Fernlichtverteilung. Die Auswertung der Studie zeigt, dass für einen mehrzeiligen Matrix LED Scheinwerfer sowohl ein subjektiver als auch ein objektiver Sichtgewinn feststellbar ist.

Es ist daher festzustellen, dass durch eine höhere Auflösung des Matrix LED Scheinwerfers Hindernisse und gefährliche Objekte sowie Situationen schneller erkannt werden können. Somit kann der Fahrer früher auf potentielle Gefahren reagieren. Dadurch ist ein Unfall entweder ganz vermeidbar oder die Aufprallgeschwindigkeit ist zumindest kleiner, falls ein Zusammenstoß nicht zu verhindern ist [MIC14a]. Laut Stämpfle [STÄ08] könnten sogar "60 % der Auffahrunfälle und fast ein Drittel der Frontalzusammenstöße vermieden werden, wenn der Fahrer nur eine halbe Sekunde früher reagieren würde". Bei 100 km/h würde das 14 m entsprechen.

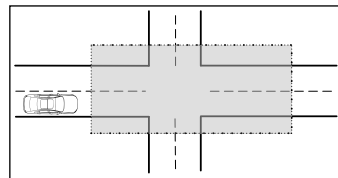
Durch eine noch höhere vertikale- und horizontale Auflösung eines Matrix LED Scheinwerfers, kann demnach die Erkennbarkeitsent-

fernung vergrößert werden. So ist es möglich durch eine hohe Auflösung des blendfreien Fernlichts den Nutzungsgrad weiter zu steigern. Dies wurde bereits durch Hummels [HUM10] bewiesen, da hierdurch sowohl die horizontale als auch vertikale Lücke zu ausblendenden Objekten verkleinert wird.

Zukünftig ist es das Ziel den Fahrer durch einen hochauflösenden Systemansatz nicht nur im Fernlichtbereich, dargestellt in Abbildung 2.5, sondern auch durch programmierbare neuartige Abblendlichtverteilungen, zu sehen in Abbildung 2.6, in seiner Wahrnehmungsaufgabe zu unterstützen. Dadurch ist es möglich anhand neuartiger Abblendlichtfunktionen, welche im Verlauf dieser Arbeit noch vorgestellt werden, die vorhandenen Defizite bei Fahrten während der Nacht weiter zu kompensieren.



**Abbildung 2.5:** Exemplarische Darstellung von ausgeblendeten Objekten eines blendfreien Fernlichts.



**Abbildung 2.6:** Exemplarische Darstellung des Ausleuchtbereichs eines programmierbaren Abblendlichts.





---

## Kapitel 3

# STAND DER TECHNIK

Die Technologien mit denen laserbasierte hochaufgelöste Pixellichtsysteme realisierbar sind, werden in diesem Kapitel näher erläutert. Hierzu erfolgt zunächst die Erörterung von verschiedenen Ansätzen zur Erzeugung von Weißlicht mittels eines Konverters oder der RGB-Technologie. Anschließend erfolgt die Diskussion der strahlgeführten und flächenmodulierten Pixellichtsysteme, welche eine hochauflösende Lichtverteilung generieren.

### 3.1 LASERBASIERTE WEIßLICHTQUELLE

Für die Erzeugung des von einem Scheinwerfer benötigten weißen Lichts, werden analog zur LED Technologie, konvertierende Lichtquellen, sowie direkt strahlende RGB Lichtquellen betrachtet. Mit einem Konverter kann, je nach verwendetem Typ, sowohl über einen ultravioletten (UV) Laser als auch durch eine blaue Laserdiode weißes Licht erzeugt werden. Bei der RGB Technologie wird mittels der Farbmischung der Farben rot, grün, blau sowie vereinzelt gelb, weißes Licht erzeugt. Die wesentlichen Unterschie-

---

de zwischen dem konvertierenden und dem RGB Ansatz sind in der Tabelle 3.1 dargestellt.

**Tabelle 3.1:** Vergleich zwischen zwei Technologien zur Erzeugung von weißem Licht.

<b>Technologie</b>	<b>Vorteil</b>	<b>Nachteil</b>
Konverter	-Augensicherheit -Hohe Leuchtdichte -Automotive Produktverfügbarkeit	-Lambert Emitter -Effizienzverlust im Konverter -Verlust der geringen Strahldi- vergenz -Farb- inhomogenität im Konverter
RGB	-Einstellbare Farbe -Keine Konverter Verluste -geringe Strahldiver- genz -Strahl effizient ablenkbar	-Degradation und Farbmischung -eingeschränkte Augensicherheit -nicht Automotive qualifiziert -Interferenzen

In den beiden folgenden Unterkapiteln werden die jeweiligen Technologien genauer untersucht.

### 3.1.1 FLUORESZENZKONVERSION

Das Prinzip der Weißlichterzeugung mittels eines Konverters basiert auf der Fluoreszenzkonversion, welche eine Untergruppe der Lumineszenzkonversion ist. In der Literatur hat sich die, aus dem Englischen ableitende, Bezeichnung „Phosphorkonversion“ durchgesetzt. In dieser Arbeit wird der Einfachheit halber der Begriff „Konverter“ für das Objekt, welches die Fluoreszenzkonversion durchführt, verwendet.

Das Funktionsprinzip der laserbasierten Weißlichterzeugung mittels der Fluoreszenzkonversion basiert auf der Konvertierung von blauem Licht in langwelligere Strahlung beziehungsweise in Licht mit einer höheren Wellenlänge. Durch Superposition von nicht konvertiertem blauem Licht entsteht weißes Licht.

Zur Erzeugung von weißem Licht sind anorganische Konverter mit einer Glas- oder Keramik-Matrix notwendig. Häufig wird das Element Cer in Form von Dotieratomen in einem Yttrium-Aluminium Granat (YAG) verwendet, um anorganische Leuchtstoffe herzustellen. Dieses emittiert gelbes Licht. Für eine gute Farbwiedergabe müssen gleichzeitig weitere rote und grüne Spektralanteile durch Spuren anderer Elemente, wie zum Beispiel Europium oder Terbium, abgedeckt werden [XIA10] [BAC07] [XIA10]. Das Material kann entweder als Pulver oder als optokeramisches Plättchen vorliegen [NIS11].

Die Farbe wird konvertiert da bei der Emission zunächst bandinterne, strahlungslose Übergänge auftreten, bei denen 20 bis 30 % der Energie, in Form von Schwingungen und Wärme, an das Kristallgitter abgegeben wird [HAG14]. Diese Energie-Umwandlung erzeugt den sogenannten „Stokes Shift“ zwischen dem Anregungs- und dem Emissionsspektrum, den alle kristallinen Konverter aufweisen. Durch diesen „Stokes Shift“ weist das, durch den Emissions-Übergang in den Grundzustand, erzeugte Photon eine größere Wellenlänge auf, als das absorbierte Photon. Um das Funktionsprinzip genauer zu erläutern sei auf Wilhelmy [WIL15] verwiesen. Die maximal erzielbare Leuchtdichte auf dem Konverter liegt zwischen 2000 cd/mm<sup>2</sup> [GUT15] und 3000 cd/mm<sup>2</sup> [IHS14].

Der Ansatz, eine laserbasierte Weißlichtquelle für ein Kraftfahrzeug zu entwickeln, wurde erstmals im Jahr 2011 von Takahashi theoretisch beschrieben [TAK11]. Die tatsächliche Implementierung erfolgte dann im Jahr 2014 in das Rennfahrzeug Audi R8 e-tron quattro [FRI15]. Die ersten Serienfahrzeuge, die mit dieser Technologie ausgestattet waren sind der Audi R8 LMX [AUD14] und der BMW i8 [WER14]. Der Hersteller der jeweiligen Lasermodule ist die Osram AG. Seit 2015 ist auch die neue Generation des Audi R8 [AUD15a] und der 7er BMW [BMW15] mit dieser Technologie ausgestattet. Das Laserlicht wird von den Fahrzeugherstellern dafür verwendet, die Sichtweite in einem horizontalen Ausleuchtungsbereich von weniger als  $\pm 4^\circ$ , mittels eines kleinen optischen Reflektors zu vergrößern.

### 3.1.2 RGB-FARBMISCHUNG

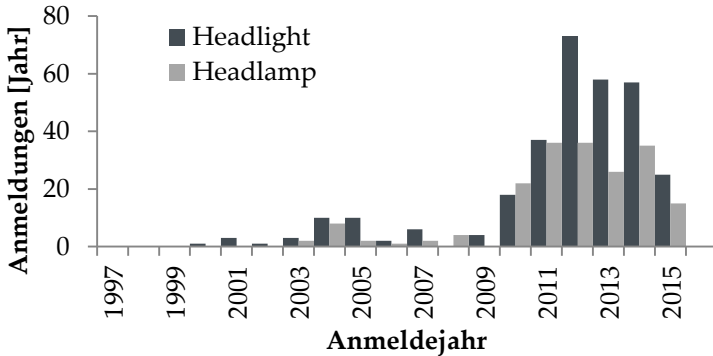
Der zweite Ansatz, weißes Licht mit Hilfe von Laserdioden zu erzeugen, ist die RGB-Farbmischung. Im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Flammersberger [FLA14] das Potential eines statischen RGB Laserscheinwerfers. Er kam zu dem Ergebnis das die RGB-Technologie die Möglichkeit bietet, die Farbtemperatur und den Farbwiedergabeindex anzupassen. Ein weiterer großer Vorteil ist die geringe Strahldivergenz. Damit lässt sich das Laserlicht mit kleinen Optiken optimal lenken [ROT15]. Ein weiterer Vorteil der geringen Strahldivergenz ist die sich daraus ergebende große Tiefenschärfe. Bei einer strahlgeführten Projektion führt dies zu einer qualitativ hochwertigen Lichtverteilung der Abblendlichtfunktion. Jedoch ist die geringe Strahldivergenz auch gleichzeitig der größte Nachteil, da aufgrund der hohen Lichtstärken die Augensicherheitsanforderungen ansteigen.

Derzeit sind aufgrund der thermischen Anforderungen nur blaue Laserdioden für den Einsatz in einem Fahrzeug geeignet. Die notwendigen grünen und roten Laserdioden befinden sich noch in der Entwicklung. Dies ist zusammen mit der Herausforderung in der Augensicherheit der Grund, dass im weiteren Verlauf dieser Arbeit die RGB-Technologie nicht weiter berücksichtigt wird. Des Weiteren sei an dieser Stelle auf die Arbeit von Roth verwiesen, der die Erzeugung von Lichtverteilungen mittels eines RGB Mikrospiegelsystems im Rahmen seiner Dissertation untersuchte [ROT16].

### 3.1.3 PATENTÜBERSICHT

Um den Stand der Technik in Bezug auf die laserbasierten Weißlichtquellen zu vervollständigen, wird im folgenden Kapitel ein ausführlicher Überblick über die relevanten Patentanmeldungen gegeben. Die Datenbasis, welche für die Erstellung der Diagramme innerhalb dieses Kapitels und dem Kapitel 3.2.3 notwendig ist, beruht auf der Datenbank der Internetplattform [www.patbase.com](http://www.patbase.com). Die hier berücksichtigten Datensätze haben einen Stand vom Februar 2016. Die Recherche erfolgte durch die Eingabe eines Suchworts. Für ein genaueres Ergebnis wurde auf die Patentklassen zurückgegriffen. Die „International Patent Classification“ (IPC) dient der weltweiten und die „Cooperative Patent Classification“ (CPC) der europäischen und amerikanischen Klassifizierung von technischen Sachverhalten.

In Abbildung 3.1 sind die Patentanmeldungen pro Jahr für die zwei Suchbegriffe „Headlight“ und „Headlamp“ in der CPC Klassifizierung F21Y2101/025 dargestellt. Die Klassifizierung ist unterteilt in „F21“ für Beleuchtung, sowie „Y2101“ für eine punktförmige Lichtquelle. Außerdem steht die Kennziffer „02“ für Miniaturlichtquellen wie beispielsweise lichtemittierende Dioden. Der Index 5 zeigt an, dass es sich um Laser Dioden handelt.



**Abbildung 3.1:** Darstellung der Anzahl der jährlichen Patentanmeldungen unter dem Suchbegriff „Headlight“ und „Headlamp“ in der Klassifikation CPC F21Y2101/025.

Es ist deutlich zu sehen, dass in den Jahre 2012, 2013 und 2014 merklich mehr Patentanmeldungen erfolgten als in den Jahren zuvor. Dies zeigt unverkennbar wie intensiv an dieser Technologie gearbeitet wurde bis sie schlussendlich 2014 in den Markt eingeführt wurde.

Erstmalig ist die Lasertechnologie in einem Kraftfahrzeugscheinwerfer in der Patentanmeldung aus dem Jahr 1968 von Gaugel erwähnt, wobei er bereits zu dieser Zeit ein System auf der Grundlage von Halbleiterlasern [GAU68] beschrieb. Das Grundprinzip auf Basis von Konvertern wird dagegen im Jahr 2010, in der Anmeldung von Wölfling, erstmalig beschrieben. Die Erfindung umfasst einen Halbleiterlaser, ein optisches Element sowie einen Konverter [WÖL10]. Auch in der Erfindungsmeldung von Erdl wird, ähnlich wie bei der Anmeldung von Wölfling, das Grundprin-

zip der laserbasierten Weißlichtquellen mit einem Konverter beschrieben. Allerdings liegt der Fokus hier auf der Dimension der leuchtenden Fläche [ERD11].

In der Ausführung von Härle wird hingegen blaues Laserlicht in einen Lichtleiter eingekoppelt. Am Ende der Faser wird das blaue Laserlicht mittels eines Konverters umgewandelt [HÄR06].

Einen gänzlich anderen Ansatz verfolgt Kishimoto. Er beschreibt einen Laserscheinwerfer auf Basis einer Reflektor Anordnung. Die Anordnung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Blende zur Reduzierung von Streulicht in den konvertierten Weißlichtstrahlengang eingebracht wird [KIS11a]. In der ebenfalls von Kishimoto eingereichten Erfindung aus dem Jahr 2011 wird ein Konverter innerhalb eines Reflektors beleuchtet. In diesem Fall werden allerdings keine Lichtwellenleiter, sondern lichtleitende Körper verwendet [KIS11b].

In einer weiteren Ausführungsform eines Laserscheinwerfers wird eine Anordnung von Finsterbusch beschrieben, bei der der Konverter innerhalb des Reflektors auf einem drehbaren Rad beweglich gelagert ist [FIN10].

Die Offenlegungsschrift von Bauer beschreibt einen Laserscheinwerfer, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Laserlichtquelle entgegengesetzt zur Hauptabstrahlrichtung des Scheinwerfers innerhalb eines Winkels zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur optischen Achse des Fahrzeugscheinwerfers leuchtet [BAU13].



In der Anmeldung von Erdl wird ein Laserscheinwerfer beschrieben, bei dem die Laserlichtquelle fest am Scheinwerfergehäuse angebracht ist, wodurch eine einfachere Wartbarkeit gewährleistet ist. Des Weiteren wird ein Sensor zur Detektion der Lichtintensität beschrieben [ERD12a].

Die Detektion von austretendem Laserlicht haben auch die folgenden Anmeldungen zum Schwerpunkt. Brendle beschreibt beispielsweise eine Detektionsvorrichtung, welche das Übertreten eines photometrischen Sicherheitsgrenzwertes erkennen kann. Die Vorrichtung ist in der Strahlenfalle eines Konverters angebracht. Mit dieser Vorrichtung kann die Funktionsweise des Konverters überwacht werden [BRE12].

Die Anmeldung von Dussault umfasst eine Detektionsvorrichtung, welche auf zwei unterschiedlichen Sensoren aufgeteilt ist. Der erste Sensor detektiert das unkonvertierte Laserlicht, der zweite Sensor detektiert das konvertierte Laserlicht [DUS12].

In der Anmeldung von Werkstetter wird eine Steuervorrichtung zur Ansteuerung einer Laserdiode beschrieben. Hierbei wird die Laserdiode in Abhängigkeit eines Sensorsignals gesteuert. Neben der Temperatur wird auch der "Lichtstrom" der Laserdiode überwacht [WER13].

Die Anmeldung, die im Rahmen dieser Arbeit gefertigt wurde, beschreibt ein Sensorsystem zur mechanischen Absicherung in Form einer Strahlenfalle [GUT13b]. Ein Verfahren für einen sicheren

Betrieb mittels eines leistungsreduzierten Stellglied- und Selbsttests wird in einer Anmeldung aus dem Jahr 2013 beschrieben [GUT13c].

## 3.2 PIXELLICHTSYSTEME

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Pixellichttechnologien vorgestellt, wobei diese Betrachtung zunächst unabhängig davon ist, ob diese Technologien auf Laser- oder LED-Lichtquellen basieren.

Durch die Einführung des Matrix LED Scheinwerfers im Audi A8 im Jahr 2013 wurde erstmals ein System, bei dem eine Lichtverteilung pixelweise erzeugt wird, in die Marktreife geführt. Neben dieser Technologie gibt es weitere Ansätze für den Einsatz eines Pixelscheinwerfers in einem Kraftfahrzeug.

Nach Kauschke [KAU06] gibt es drei Arten zur Generierung einer Lichtverteilung. Die additive, die subtraktive und die variable optische Erzeugung, welche der strahlgeführten Technologie entspricht. Nach Götz [GÖT05], der in seiner Arbeit mehrere Pixellichtsysteme vorstellt, sind die strahlgeführten Technologien auch den additiven Systemen zuordenbar. In der hier vorliegenden Promotionsschrift wird diese Einordnung ebenfalls verwendet.

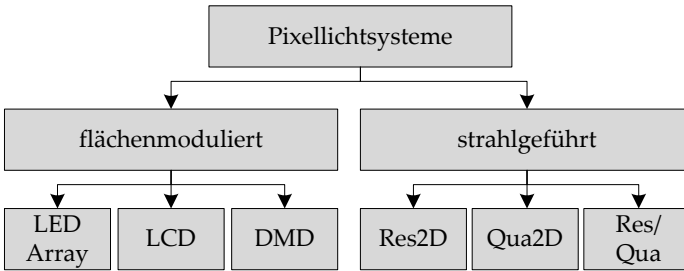
In dieser Arbeit werden die Systeme zusätzlich in strahlgeführt und flächenmoduliert unterschieden. Einen Überblick über die Eingruppierung der Systeme gibt Tabelle 3.2.

**Tabelle 3.2:** Darstellung der Unterteilung von vier hochauflösenden Scheinwerfertechnologien in die Beleuchtungs-, Modulations- und Ansteuerungsart sowie in das Bilderzeugungsprinzip.

<b>Technologie</b>	<b>Beleuchtung</b>	<b>Prinzip</b>	<b>Modulation</b>	<b>Ansteuerung</b>
LCD	Transmissiv	Subtraktiv	Fläche	Diskret
DMD	Reflektiv	Subtraktiv	Fläche	Diskret
$\mu$ AFS	Aktiv	Additiv	Fläche	Diskret
Scanner	Transmissiv	Additiv	Strahl- geführt	Kontinu- ierlich

In Kauschkes Arbeit wurden über 30 Technologien hinsichtlich ihres Einsatzes als Pixellicht in einem Kraftfahrzeug untersucht. Durch eine Analyse reduzierte er diese Anzahl auf vier Konzepte. Die DMD, der sogenannten „Analog Micromirror Device“ (AMD), der Liquid Crystal on Silicon (LCoS) und Scanner Technologie. Einen Gesamtüberblick über die verschiedenen Technologien gibt die Ausarbeitung von Schmidt [SCH14].

In dieser Arbeit werden aufgrund des aktuellen Forschungsstands ein reflektives System (DMD), ein transmissives System (LCD), ein aktives System (LED Array) und ein strahlgeführtes System diskutiert. In der Abbildung 3.2 sind die verschiedenen Technologien nochmals dargestellt.



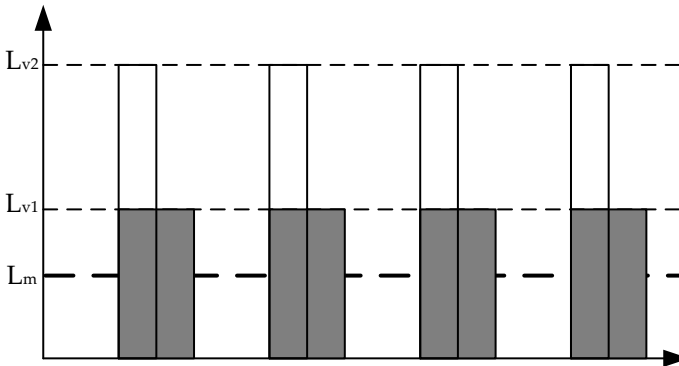
**Abbildung 3.2:** Übersicht über verschiedene hochauflösende Pixellichtsysteme und deren Unterteilung in flächenmodulierte und strahlgeführte Systeme.

### 3.2.1 STRAHLGEFÜHRTE SYSTEME

Zunächst wird die strahlgeführte Technologie vorgestellt. Diese basiert auf einer Ablenkeinheit die einen oder mehrere Laserstrahlen kontinuierlich in eine oder zwei Achsen ablenkt. Der Bildaufbau beruht hierbei auf der Trägheit des Auges. Der Helligkeitseindruck ergibt sich gemäß dem Talbot'schen Gesetz. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen periodischen und kontinuierlichen Reizen. Die vom Auge wahrgenommene Leuchtdichte  $L_m$  innerhalb einer Zeitdauer  $T$  entspricht laut Talbot dem arithmetischen Mittelwert der einzelnen Lichtpulse mit der Leuchtdichte  $L_v$ , wie aus Gleichung (3.1) ersichtlich wird.

$$L_m = \frac{1}{T} \int_0^T L_v(t) dt \quad (3.1)$$

Damit das Auge nicht zwischen den einzelnen Lichtpulsen differenzieren kann, muss jedoch gelten, dass die Pulsung oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) liegt.



**Abbildung 3.3:** Darstellung der im Mittel wahrgenommenen Leuchtdichte  $L_m$  für zwei unterschiedliche Lichtpulse mit unterschiedlicher Intensität und Dauer nach Brückner [BRÜ32].

Es gibt verschiedene Arten von strahlgeführten Systemen. Götz [GÖT05] beschreibt beispielsweise einen Scheinwerfer bei dem ein Lichtstrahl durch zwei mechanisch angetriebene Spiegel abgelenkt wird. Die kompakteste Ablenkeinheit in diesem Bereich ist jedoch der sogenannte Mikrospiegel, welcher ein „Mikro Opto Elektro Mechanisches-System“ (MOEMS) ist.

Mikrospiegel weisen verschiedene Antriebsarten auf. Alliger [ALL15] untersuchte im Rahmen seiner Abschlussarbeit einen elektromagnetische, einen elektrostatischen und einen piezoelektri-

schen Antrieb. Die jeweiligen Vor- und Nachteile sind seiner Arbeit zu entnehmen.

Derzeit wird im Rahmen des BMBF Förderprojektes „Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer“, kurz „iLaS“, mit dem Förderkennzeichen 13N13086, der Einsatz der Mikrospiegeltechnologie in einem Kraftfahrzeugscheinwerfer untersucht. Beteiligte Forschungspartner sind bei diesem Projekt das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Audi AG, die Robert Bosch GmbH, die Osram AG und die ZKW GmbH [BUN14b]. Im Rahmen dessen sind auch die Veröffentlichungen von Petersen [PET15] sowie die Arbeit mit dem Titel „Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer“ [GUT15] entstanden. Des Weiteren sei in diesem Zusammenhang auf die Veröffentlichung von Reisinger [REI15b] verwiesen.

Das Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie (ISIT) forscht an diversen Mikrospiegeltechnologien. In den Veröffentlichungen von Hofmann [HOF16] und Senger [SEN15] wird ein elektrostatisch resonant betriebener Mikrospiegel, der über die Änderung einer Amplitude eine Intensitätsumverteilung für einen Kraftfahrzeugscheinwerfer erzeugt, beschrieben. In der Veröffentlichung von Hofmann aus dem Jahr 2014 [HOF14] liegt der Schwerpunkt auf der Reduzierung des durch das Scannen verursachte „Flimmern“ und dem Reflex an der Abschlusscheibe eines biaxialen Mikrospiegels.

Wie eine Ansteuerung eines solchen in einem Kraftfahrzeug verbauten strahlgeführten Laser RGB-Systems auszusehen hat, wird

in Roths Arbeit veranschaulicht, der sich dieses Problem zum Forschungsschwerpunkt gemacht hat [ROT15], [ROT14a], [ROT16].

### **3.2.2 FLÄCHENMODULIERTE SYSTEME**

In diesem Unterkapitel liegt der Schwerpunkt auf in Fahrzeugen einsetzbaren flächenmodulierten Systemen wie der LED, LCD und DMD Technologie. Diese werden im Folgenden detailliert dargestellt.

#### **3.2.2.1 LED ARRAY**

LED Arrays waren die ersten Pixellichtsysteme, welche in Kraftfahrzeugen eingesetzt wurden. Bereits im Jahr 2005 beschrieb Griesinger [GRI05] ein Array welches mit 32 x 6 individuell ansteuerbaren LEDs eine adaptive Lichtfunktion erzeugte. 2009 stellte Mercedes Benz ein Forschungsfahrzeug mit einem LED Array von 4 x 20 Pixel vor [MOI09]. Einen Meilenstein in der Erforschung der Array Technologie bildet auch das vom BMBF geförderte Forschungsprojekt „NanoLux“ [HUM09], welches in den Jahren von 2005 bis 2008 bearbeitet wurde. In diesem Zusammenhang entstand auch die Dissertation von Hummel [HUM10]. Die von ihm durchgeführten Forschungen resultierten im Jahr 2013 in einer ersten Serienanwendung, welche in einem Audi A8 ihr Debut feierte [BER14c]. Die Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die, mit Stand

zum Juni 2016, im Markt verfügbaren Systeme. Die Anzahl der Segmente und die Bezeichnung der Scheinwerfer kann den entsprechenden Quellen entnommen werden [MER14], [MAZ14], [ADA15], [HEL16].

Derzeit wird die Lichtverteilung durch diskrete LEDs erzeugt. Aufgrund der Abstände zwischen den LEDs ist die Auflösung beschränkt. Zukünftig soll die LED Array Technologie eine höhere Auflösung erzielen [FIS14]. Hierzu sei auf das BMBF Förderprojekt „Integrierte  $\mu$ -strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme ( $\mu$ AFS)“ verwiesen [BUN13]. Ziel des Förderprojekts ist es, ein Array mit einer Auflösung von 1024 Pixeln zu entwickeln. Das Pixelraster hat eine Größe von  $125 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$ , wobei der Lichtstrom eines Pixels bei einem Strom von 12 mA 3 lm beträgt. Die Herausforderung besteht in der Entwärmung sowie dem Kontrast zwischen den einzelnen Pixeln [LIE15] [GRÖ15] [MOE16].



**Tabelle 3.3:** Übersicht über LED Array Scheinwerfersysteme verschiedener Hersteller (Stand Juni 2016).

Hersteller	Modell	Bezeichnung	Segmente	Markteinführung
Audi	Audi A8	Matrix LED Scheinwerfer	25	2013
	Audi TT		12	2014
	Audi A7		19	2014
	Audi A6		19	2014
	Audi Q7		15	2015
	Audi A4		12	2015
	Audi A3		15	2016
	Audi A5		15	2016
Daimler	CLS	Multibeam	24	2014
	E-Klasse		84	2016
Mazda	Mazda 6	ALH	4	2015
	Mazda CX-5		4	2015
Opel	Astra	Intellilux	8	2015

### 3.2.2.2 LCD

Die LCD Technologie wird transmissiv betrieben. Abhängig von der Polarisierung kann Licht durch den Flüssigkristall transmittiert werden oder nicht. Die LCD Technologie für den Einsatz in einem Kraftfahrzeug wird derzeit im Rahmen des BMBF Förderprojekts „Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung“ kurz VoLiFa2020 [BUN14a] erforscht. Dabei wird ein Scheinwerfer aufgebaut, bei dem ein LCD Display durch ein LED Array beleuchtet wird.

Die Effizienz des LCD Scheinwerfers ist abhängig von der bereitgestellten Auflösung, da die abgeschirmten "Dünn Film Transistoren", im englischen auch "Thin-Film Transistor" (TFT) genannt, und die Leiterbahnen das verfügbare Licht abschirmen. Je größer die Auflösung ist, desto mehr Leiterbahnen und TFTs sind notwendig. Für eine Auflösung von 30.000 Pixeln beträgt die Effizienz 15 %. Durch die Verwendung von zwei Polarisations-Pfaden kann diese auf 30 % erhöht werden [HES15]. Laut Schmidt [SCH14] ist bei der LCD Technologie die thermische Entwärmung des Displays die größte Herausforderung. Reinprecht [REI15a] schreibt, dass um einen hohen Kontrastwert zu erzielen, das Licht der LEDs senkrecht auf das LCD Display einfallen muss, sowie das Polarisationskonzept dem Kontrast anzupassen ist. Gleichzeitig kann das LCD Display nicht verkleinert werden, da ansonsten die Effizienz weiter sinkt. Daraus resultiert ein großes optisches System.

Um die oben erwähnten Polarisationsverluste zu vermeiden gibt es einen Ansatz von Willeke [WIL14b]. Er untersuchte im Rahmen seiner Promotion wie mit einer RGB-Laserlichtquelle ein LCD Display hinterleuchtet werden kann.

### 3.2.2.3 DMD

Die DMD Technologie ist ein reflektives System. Dazu wird das Licht einer Lichtquelle durch einen Bildgeber mit mehreren hunderttausend einzelnen Mikrospiegeln in einzelne Pixel unterteilt. Jeder Spiegel hat eine An-, Aus- und Flatposition. Im Aus-Zustand wird das Licht eines Pixels absorbiert. Im An-Zustand wird der entsprechende Pixel über ein optisches System abgebildet. Im Flat-Zustand erfolgt keine mechanische Auslenkung der Spiegel. Durch die zeitliche Steuerung der An- und Aus-Zustände in Form einer Puls-Weiten Modulation können verschiedene Graustufen generiert werden [BHA15]. Für tieferegehende Informationen sei auf die Literatur von Lee verwiesen [LEE13].

Die Idee einen DMD in einen Scheinwerfer zu implementieren, wurde bereits im Jahr 2001 von Enders [END01a] und im Jahr 2005 von Götz [GÖT05] verfolgt. Roslak arbeitete im Rahmen seiner Dissertation an einer Systemumsetzung und hatte den Fokus auf der Funktionsentwicklung [ROS05a][ROS05b]. Kauschke entwickelte den entsprechenden DMD Scheinwerfer. [KAU06]. Die Arbeit

von Günther fokussierte sich auf das zugrunde liegende optische Konzept [GÜN10].

Obwohl die DMD Technologie als zukunftsweisend eingestuft wurde, scheiterte eine Serienentwicklung an verfügbaren Lichtquellen, an der automotiv tauglichen Verfügbarkeit des DMD Chips [LEE11] und am hohen Leistungsbedarf von über 200 W. Mittlerweile gibt es jedoch DMD Chips, die für ein Head-up-Display (HUD) entwickelt wurden, und in einem Kraftfahrzeug zum Einsatz kommen [PET14]. Der Vorteil für den Einsatz dieser Technologie im Kraftfahrzeug liegt in der hohen Auflösung [REI15b]. Dabei haben die Spiegel in einem solchen Aufbau eine Kantenlänge von  $7,6 \mu\text{m}$ . Die Auflösung beträgt, abhängig von der der sogenannten „Manhattan“ oder „Diamonds“ Anordnung, entweder  $608 \times 684$  oder  $854 \times 480$  Pixel. Der Chip wird seitlich von der Lichtquelle beleuchtet [TEX15]. Die Auflösung hat, anders als bei der LCD Technologie, keine Auswirkung auf die Effizienz, da die CMOS-Speicherzellen unter den Spiegeln platziert sind [BHA15].

Eine Herausforderung dieser Technologie ist allerdings der begrenzte Ablenkwinkel zwischen An- und Aus-Zustand, welcher dazu führt, dass die Projektionsoptiken und Lichtabsorber nahe bei einander sein müssen, was jedoch Auswirkung auf das Design hat [REI15a]. Außerdem ist der Kontrast abhängig von der gewählten Apertur der beleuchtenden Optik, welche wiederum von der Etendue der Lichtquelle abhängt [BHA15][GUT14b]. Der Schwarzwert eines DMD Scheinwerfers ist ebenfalls eine Herausforderung. Denn durch Reflektionen an dem für die Kapselung notwendigen

Fenster, wird das Licht reflektiert. Dadurch kann der in Kapitel 5.1 beschriebene Blendschwellwert von 350 cd überschritten werden. Ein noch zu lösendes Problem ist die Entwärmung des DMD Chips [SCH14], denn in Abhängigkeit der Temperatur kann sich die Torsionsfeder dauerhaft mechanisch verformen, so dass nur noch der An- oder Aus-Zustand angefahren werden kann. Dieses Fehlerbild wird auch als "Hinge Memory Effekt" bezeichnet. Um zu vermeiden, dass die einzelnen Spiegel in dem An- oder Aus-Zustand feststecken, müssen die Spiegel in Abhängigkeit der Temperatur ihren Zustand periodisch ändern. Das Pulsverhältnis ist hierbei abhängig von der anliegenden Temperatur am DMD Chip, sowie der gewünschten Lebensdauer [SON02].

### 3.2.3 PATENTÜBERSICHT

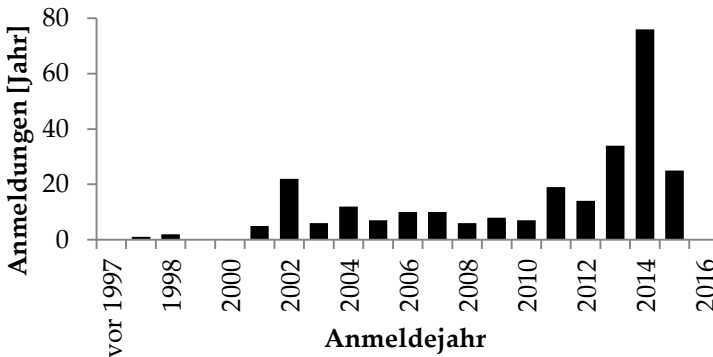
In der folgenden Übersicht ist die Anzahl der Patentanmeldungen der verschiedenen Pixellicht-Technologien zu sehen<sup>1</sup>. Es ist zu berücksichtigen, dass die Zeit zwischen Anmeldung und Offenlegung 18 Monate beträgt. In Abbildung 3.4 sind die weltweiten Patentanmeldungen für den Suchbegriff „Micromirror“ dargestellt. Die Bedeutung der Klassifizierung IPC und CPC können dem Kapitel 3.1.3 entnommen werden. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass der Höchstwert mit 74 eingereichten Anmeldungen

---

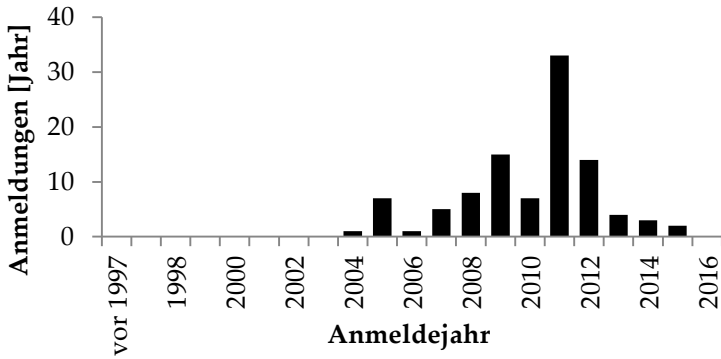
<sup>1</sup>Es ist zu berücksichtigen, dass die Zeit zwischen der Patentanmeldung und der Offenlegung 18 Monate beträgt.

im Jahr 2014 liegt. Insbesondere die Aktivitäten des ISIT und die Aktivitäten der im „iLaS“ Förderprojekt beteiligten Projektpartner könnten der Grund hierfür sein.

Die jährliche Zahl der Erfindungsmeldungen für die Suchbegriffe „LED Array“ in der Klasse B60Q1/04 sind in der Abbildung 3.5 zu sehen. Die beschriebene Suchkategorie setzt sich dabei folgendermaßen zusammen: Die Kennung "B60" entspricht einem Fahrzeug. Die Unterklassifizierung "Q1" steht für eine Beleuchtungsvorrichtung und der Index "04" bezeichnet einen Scheinwerfer. Mit einem vorläufigen Maximum von 33 Anmeldungen pro Jahr wurde in Bezug auf ein LED Array im Jahr 2011 die meisten Erfindungen eingereicht.

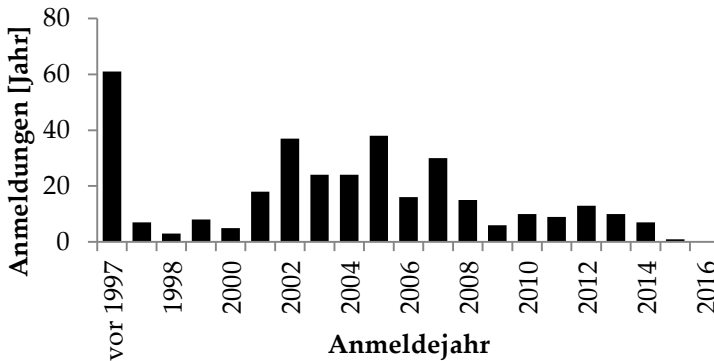


**Abbildung 3.4:** Eingereichte Erfindungen unter dem Suchbegriff „Micromirror“ in der Klassifikation „Leuchten besonders ausgebildet für Fahrzeuge“.



**Abbildung 3.5:** Eingereichte Anmeldungen unter dem Suchbegriff „LED Array“ in der Klassifikation „Scheinwerfer“.

Die Anzahl der Patentanmeldung zum Thema „LCD“ sind in der Abbildung 3.6 zu sehen. Hier zeigt sich, dass kontinuierlich Patentanmeldungen erfolgten was unter Umständen an der frühen Verfügbarkeit dieser Technologie liegen könnte.



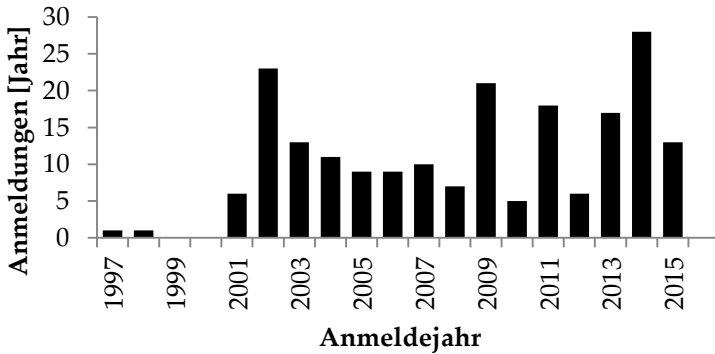
**Abbildung 3.6:** Patentanmeldung pro Jahr unter dem Suchbegriff „LCD“ in der Klassifikation IPC B60Q1/04, „Scheinwerfer“.

In der Abbildung 6.6 sind für den Suchbegriff "DMD" die jährlich eingereichten Erfindungsmeldungen dargestellt. Dabei sind in der Auswertung Erfindungen in der IPC Klasse F21S8/10 berücksichtigt. Diese besteht aus der Kennung „F21“, welche eine Beleuchtungseinheit kennzeichnet, sowie der Unterklassifizierung „S8“, welche aussagt, dass die Leuchte eine Befestigung aufweist. Mit dem Index „10“ wird ausgedrückt, dass dies insbesondere für ein Fahrzeug gilt.

Beim Betrachten des Schaubilds zeigen sich zwei Maxima. Im Jahr 2001 sind 23 Erfindungen pro Jahr eingereicht worden. Zu dieser Zeit hatte die DMD Technologie eine hohe Aktualität wie aus Kapitel 3.2.2.3 ersichtlich ist. Ein weiteres Maximum zeigt sich im Jahr 2014, in dem 28 Erfindungen eingereicht wurde. In Verbindung mit der durchgeführten Literaturrecherche kann daraus geschlossen



werden, dass wieder vermehrt an dieser Technologie gearbeitet wird.



**Abbildung 3.7:** Patentanmeldung pro Jahr unter dem Suchbegriff „DMD“ in der Klassifikation IPC F21S8/10, „Leuchten besonders ausgebildet für Fahrzeuge“.

Um eine detailliertere Übersicht zu erhalten werden im folgenden Abschnitt die wichtigsten Patentanmeldungen für die Weiterentwicklung von laserbasierten Pixellichtsystemen jeweils kurz umrissen.

In einer der ersten Patentschriften über LCD befindet sich die Anmeldung von Seko [SEK88], der erstmals den Einsatz der LCD Technologie in einem Kraftfahrzeug beschreibt.

Die Erfindung von Wegwerth [WEG09] umfasst ein Scheinwerfersystem auf Basis eines transmissiven Bildgebers wie beispielsweise einem LCD. Die Beleuchtung erfolgt mittels mehrfarbiger LED oder

Laserdioden, welche unterschiedliche Bereiche auf dem Bildgeber ausleuchten. Zur Einstellung des Fokus beinhaltet das Scheinwerfersystem ein Objektiv mit variabler Brennweite.

In der von Enders [END01b] eingereichten Idee ist ein Beleuchtungsverfahren beschrieben, welches auf der reflektiven DMD, beziehungsweise der transmissiven LCD-Technologie beruht. Die Lichtquelle umfasst entweder eine Halogen oder Gasentladungslampe. Mittels des Projektionssystems sollen Navigationsinformationen auf der Straße angezeigt werden.

Eine weitere Offenlegungsschrift von Enders [END97] umfasst einen DMD Chip, welcher in einen Scheinwerfer verbaut ist. Die Beleuchtung erfolgt mittels einer Xenon-Hochdruckgasentladungslampe. Die Anmeldung zeichnet sich auch dadurch aus, dass Navigationsinformationen auf der Straße darstellbar sind.

In der Offenlegungsschrift von Yamamura [YAM13] wird die Idee von Enders noch präzisiert indem ein LCD oder DMD mittels mehrerer Lichtquellen in unterschiedlichen Bereichen ausgeleuchtet werden.

Die Offenlegungsschrift von Anh [ANH11] veranschaulicht einen Scheinwerfer, welcher mittels eines DMDs eine Lichtverteilung erzeugt. Die Lichtquelle ist wie bei Enders eine Hochdruckdampflampe. Das beschriebene Verfahren umfasst die Darstellung von Lichtfunktionen wie Kraftstoffzustand und Fahrrietzungszeichen auf der Straße.

Die Offenlegungsschrift von Roslak [ROS04] beschreibt eine Zusatzlichtverteilung eines Scheinwerfers, die entgegenkommende und vorrausfahrende Fahrzeuge ausblendet. Die Anpassung der Lichtverteilung erfolgt durch einen DMD, der von mehreren LEDs beleuchtet wird, wobei die LEDs in Abhängigkeit von Steuerdaten aktivierbar, beziehungsweise deaktivierbar sind.

Die gezielte Steuerung der LEDs zur energieeffizienten Nutzung ist in der Anmeldung „Dimmen einer Lichtquelle“ beschrieben [GUT16b]. Hierbei werden die Lichtquellen in Abhängigkeit des Nutzungsgrades der einzelnen Spiegelemente angesteuert.

In der Patentanmeldung von Wilhelmy [WIL14a] wird die gezielte Ausleuchtung eines DMDs beschrieben. Dabei wird das Licht so vorgeformt, dass sich der hellste Bereich im zentralen Sichtfeld befindet.

Ein anderer Ansatz zur Erzeugung einer Lichtverteilung hat Scherr ausgearbeitet [SCH10]. Er beschreibt einen Mikrospiegel, der eine Vielzahl an individuell ansteuerbaren Positionen besitzt. Hierbei handelt es sich im Prinzip um einen DMD Chip, der nicht nur eine An-, Aus-, und „Flat“-Stellung sondern auch mehrere Zwischenpositionen aufweisen muss. Somit beschreibt er ein Hybridsystem, bestehend aus der flächenmodulierten und strahlgeführten Technologie.

Auch für die strahlgeführten Technologie lassen sich zahlreiche Patente finden. Es gab bereits im Jahr 1988 eine Anmeldung von Soardo [SOA88] die dadurch gekennzeichnet ist, dass zur Erzeu-

gung einer Lichtverteilung ein Lichtstrahl mittels eines um die eigene Achse drehenden zylindrische Korpus oder einer Scheibe abgelenkt wird. Die Lichtquelle kann eine "Glühfadenlichtquelle", ein "Lasergenerator" oder eine Entladungslampe sein.

Das prinzipielle Scanprinzip mittels Mikrospiegel wird von den Anmeldungen von Taner [TAN07], Reiners [REI11] und Erdl [ERD12b] abgedeckt. In der Ausarbeitung von Erdl werden auch mehrere Mikrospiegel zur Erzeugung einer Lichtverteilung verwendet [ERD12c].

---

## Kapitel 4

# KONZEPTVERGLEICH

### 4.1 TECHNOLOGIE BENCHMARK

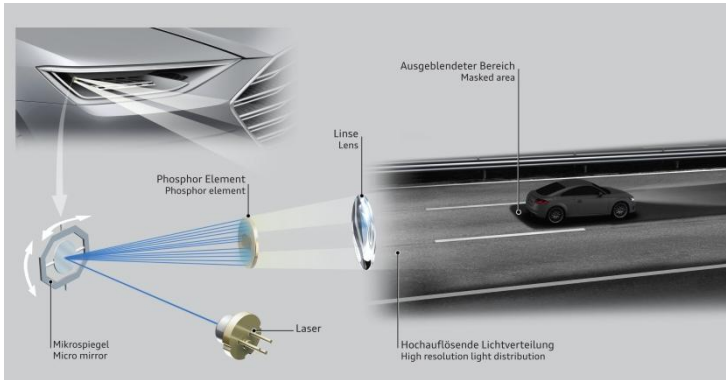
Nachdem im Kapitel 3 der Stand der Technik von laserbasierten Pixellichtsystemen vorgestellt wurde, erfolgt in diesem Kapitel ein substantieller Vergleich zwischen den flächenmodulierten und strahlgeführten Systemen. Hierbei gilt, dass alle Technologien auf der Laser-Lumineszenzkonversion basieren, da der grüne „Dioden Laser nicht die geforderten Bedingungen wie optische Ausgangsleistung und Temperaturstabilität erfüllt“ [GUT14c].

Im strahlgeführten Ansatz wird eine Ablenkeinheit mit drei unterschiedlichen Betriebsarten untersucht. Der strahlgeführte Ansatz wird nachfolgend als Matrix-Scanner-Technologie bezeichnet und ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Für ein flächenmoduliertes System wird die Matrix-DMD-Technologie, dargestellt in Abbildung 6.6, ausgewählt da diese als einzige Technologie eine Qualifizierung nach Kraftfahrzeug-standards aufweisen kann. Jedoch können die Ergebnisse der Berechnungen durch Anpassung der Effizienzwerte auf die LCD- und LCoS-Technologie übertragen werden.

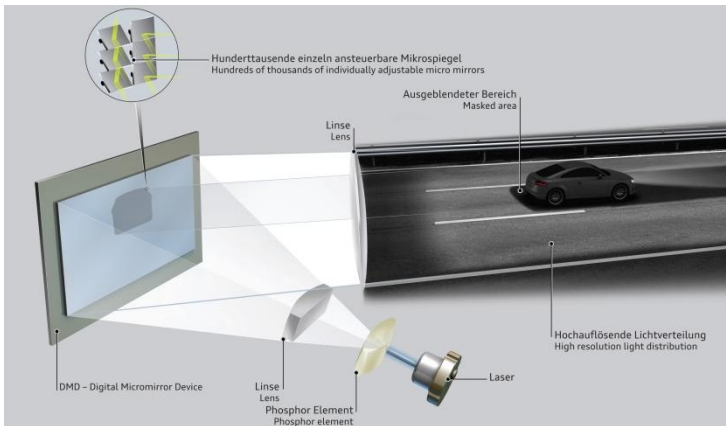
---

## Konzeptvergleich

---



**Abbildung 4.1:** Funktionsprinzip Matrix-Scanner-Technologie [BUN11].



**Abbildung 4.2:** Funktionsprinzip Matrix-DMD-Technologie [AUD15b].

Für das in dieser Arbeit verwendete Berechnungsmodell wird eine Konversionsrate von  $120 \text{ lm/W}_{\text{opt}}$  und eine Wall Plug Efficiency

(WPE) der Laserdiode von 28 % [OSR15] angenommen. Die Systemwirkungsgrade und die Effizienzfaktoren, welche bereits im Rahmen einer Veröffentlichung vorgestellt wurden [GUT16c], sind den nachstehenden Tabellen entnehmbar.

**Tabelle 4.1:** Übersicht über den Wirkungsgrad der Matrix-Scanner-Technologie [GUT16c].

Beitragendes Element	Wirkungsgrad $\eta_{\text{Sca\_Sys}}$
Laser Primäroptik $\eta_{\text{Sca\_Pr}}$	96 %
Mikrospiegel $\eta_{\text{Sca\_Mirror}}$	99,5 %
Sekundäroptik $\eta_{\text{Sca\_Se}}$	35 %
<b>Systemwirkungsgrad <math>\eta_{\text{Sca\_Sys}}</math></b>	<b>33,4 %</b>

**Tabelle 4.2:** Übersicht über den Wirkungsgrad der Matrix-DMD-Technologie [GUT16c].

Beitragendes Element	Wirkungsgrad $\eta_{\text{DMD\_Sys}}$
Laser Primäroptik $\eta_{\text{DMD\_Pr}}$	96 %
Beleuchtungsoptik $\eta_{\text{DMD\_Ilu}}$	64 %
DMD $\eta_{\text{DMD\_Mirror}}$	67,5 %
Sekundäroptik $\eta_{\text{DMD\_Se}}$	96 %
<b>Systemwirkungsgrad <math>\eta_{\text{DMD\_Sys}}</math></b>	<b>39,8 %</b>

Die realen Effizienzwerte sind von System zu System unterschiedlich. In der Ausarbeitung von Reisinger [REI15b] beträgt der Systemwirkungsgrad der Matrix-Scanner-Technologie  $\eta_{\text{Sca\_Sys}}$  27 % und der Systemwirkungsgrad der Matrix-DMD-Technologie  $\eta_{\text{DMD\_Sys}}$  22 %. In der nachstehenden Tabelle 4.3 ist eine Bewer-

tungsmatrix dargestellt, welche die fundamentalen Parameter beider Technologieansätze vergleicht. Die Bewertungen sowie tiefergehende Erläuterungen sind in Teilen der Ausarbeitung aus dem Jahr 2015 zu entnehmen [GUT15].

**Tabelle 4.3:** Bewertungsmatrix zwischen der Matrix DMD und Matrix-Scanner-Technologie.

Thema	Erklärung	Gewicht	DMD	Scanner
Funktions-effizienz	Systemwirkungsgrad unabhängig von Lichtfunktion	3	1 (-)	3 (+)
Variabilität	Lichtschwerpunkt verschiebbar	2	1 (-)	3 (+)
Einblendauflösung	Darstellung des kleinsten Pixels	2	3 (+)	1 (-)
Temperatur	Temperaturabhängiger Bildgeber	1	1 (-)	3 (+)
Größe Sekundäroptik	Sichtbare Optik im Scheinwerfer	3	3 (+)	1 (-)
Optische Effekte	Flimmern und Flackern	2	3 (+)	2 (0)
Fehlerpixel	Erkennung von Fehlerpixeln	2	1 (-)	3 (+)
Summe			29	33

Aus der Tabelle 4.3 wird ersichtlich, dass die Matrix-Scanner-Technologie mit 33 und die Matrix-DMD-Technologie mit 28 Punkten bewertet wird. Unabhängig davon ist festzuhalten, dass ein wesentlicher Vorteil der Matrix-Scanner-Technologie die Variabilität



der Lichtverteilung ist. Sie ist damit gut für Lichtfunktionen geeignet, die den Lichtschwerpunkt (LSP) verschieben oder nur punktuell Bereiche ausleuchten. Im nächsten Kapitel wird für einen substantiellen Vergleich der Technologien, der Nutzungsgrad und die benötigte optische Leistung für verschiedene Lichtfunktionen berechnet.

### 4.2 LEISTUNGSABSCHÄTZUNG

In diesem Kapitel erfolgt eine konzeptionelle Untersuchung, der auf Laser basierenden, strahlgeführten und flächenmodulierten Technologien. Den Schwerpunkt bildet die Berechnung der benötigten optischen Leistungen in Abhängigkeit der Lichtfunktion. Auf Basis der Ergebnisse kann die geeignetste Technologie ausgewählt werden. Für die strahlgeführte Technologie sind drei unterschiedliche Antriebsarten eines Mikrospiegels zu untersuchen. Der flächenmodulierte Ansatz fokussiert sich auf die Matrix-DMD-Technologie.

Die Berechnungen gelten jeweils für einen rechten Scheinwerfer<sup>2</sup>, wobei die Lichtverteilung aus jeweils nur einem Matrix Scanner oder DMD Modul erzeugt wird. Alle Winkel, sowie die Anbaupositionen sind den Anhängen B.1 und B.2 entnehmbar. Die für die

---

<sup>2</sup> Für einen linken Scheinwerfer sind die gleichen photometrischen verwendbar.

Berechnungen zu berücksichtigenden horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel sind für  $\alpha_{RS}$  von  $-20^\circ$  bis  $+20^\circ$  und für  $\beta_{RS}$  von  $-10^\circ$  bis  $+10^\circ$  dimensioniert. Es werden die Leistungen für fünf Lichtfunktionen untersucht. Die Lichtwerte des Abblend- und das Fernlichts basieren auf dem arithmetischen Mittel der Scheinwerferlichtverteilungen eines Audi A5 (AU484) Xenon-, eines Audi A7 (AU573) LED- und eines Audi A8 (AU641) Xenonscheinwerfers. Daraus ergibt sich für das Abblendlicht, im Folgenden als „Funktion 1“ beschrieben, ein Lichtstrom von 682 lm. Die maximale Lichtstärke beträgt 33.152 cd.

Das Fernlicht, auch als „Funktion 2“ beschrieben, umfasst neben dem Abblendlicht noch die Lichtverteilung oberhalb von  $-0,57^\circ$  und hat einen Gesamtlichtstrom von 1.236 lm, sowie eine maximale Lichtstärke von 59.721 cd. Der Lichtstrom des Fernlichtbereichs liegt mit einem Wert von 554 lm über dem von Albrecht definierten Wert für ein Standardfernlicht von 400 lm [ALB15].

In der „Funktion 3“ wird ein Fahrzeug entblendet. Der Lichtstrom reduziert sich dadurch auf 1.129 lm und die maximale Lichtstärke erzielt einen Wert von 57.045 cd. Der maskierte Bereich entspricht einem, gemäß Anhang B.1 definierten, Standardfahrzeug, welches in 30 m Entfernung vor dem Ego-Fahrzeug entblendet wird. Daraus ergibt sich ein horizontaler und vertikaler Ausblendöffnungswinkel von  $\alpha_{RS} = -3,05^\circ$  bis  $\alpha_{RS} = +0,77^\circ$  und von  $\beta_{RS} = -0,57^\circ$  bis  $\beta_{RS} = +1,64^\circ$ . Dieses Szenario ist als repräsentativ zu betrachten, da der Winkel innerhalb den von Hummel [HUM10] und Austerschulte [AUS13]

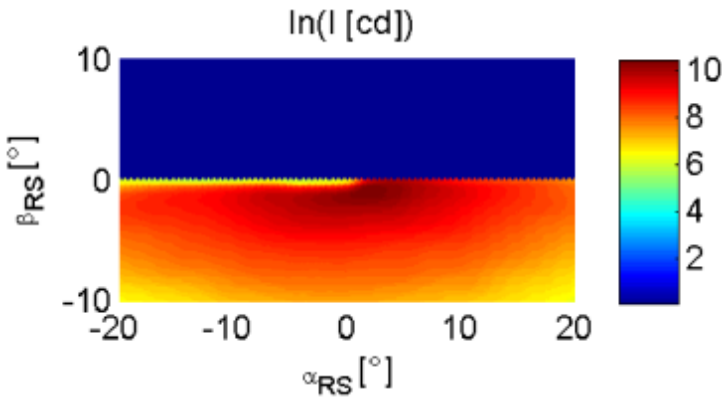
definierten Bereichen mit der höchsten Anzahl an auszublendenden Objekten liegt.

In der „Funktion 4“ wird ein Markierungslicht dargestellt. Laut Schneider [SCH11] ist eine Beleuchtungsstärke von 6,2 lx in 100 m Entfernung notwendig. Deshalb wurde die Lichtstärke für das Markierungslicht auf 62.000 cd festgelegt. Der Gesamtlichtstrom beträgt 1.242 lm. Der Öffnungswinkel soll einer Markierung entsprechen, die eine Person mit einer Schulterbreite von 0,7 m und einer Größe von 1,8 m in einem Abstand von 65 m am rechten Fahrbahnrand hervorhebt. Dadurch ergibt sich ein horizontaler Öffnungswinkel  $\alpha_{RS}$  von  $+1,01^\circ$  bis  $+1,63$  und ein vertikaler Öffnungswinkel  $\beta_{RS}$  von  $-0,57^\circ$  bis  $+1,01^\circ$ .

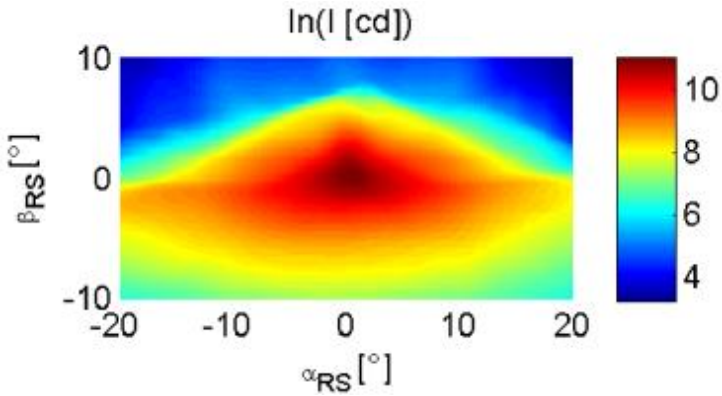
Die „Funktion 5“ umfasst die Projektion einer neuartigen Lichtverteilung innerhalb des Abblendlichts. Es wurde angenommen, dass wie in Kapitel 5.3 beschrieben, die Fahrspur einer Standardstraße in 10 m bis 25 m vor dem Ego-Fahrzeug mit einer dreifachen Lichtstärke ausgeleuchtet wird. Die maximale Lichtstärke beträgt 87.756 cd und der Lichtstrom beläuft sich auf 958 lm. Der linke untere Punkt hat die Winkelkoordinaten  $\alpha_{RS} = -13,2^\circ$  und  $\beta_{RS} = -3,72^\circ$ . Der rechte untere Punkt hat die Winkelkoordinaten  $\alpha_{RS} = +6,56^\circ$  und  $\beta_{RS} = -3,72^\circ$ . Der linke obere Punkt hat die Winkelkoordinaten  $\alpha_{RS} = -5,37^\circ$  und  $\beta_{RS} = -1,49^\circ$  und der rechte obere Punkt hat die Koordinaten  $\alpha_{RS} = +2,63^\circ$  und  $\beta_{RS} = -1,49^\circ$ .

In den folgenden Abbildungen 4.3 bis 4.7 ist die Lichtstärke von fünf verschiedenen Lichtfunktionen für einen rechten Scheinwerfer in logarithmischer Falschfarbendarstellung zu sehen.

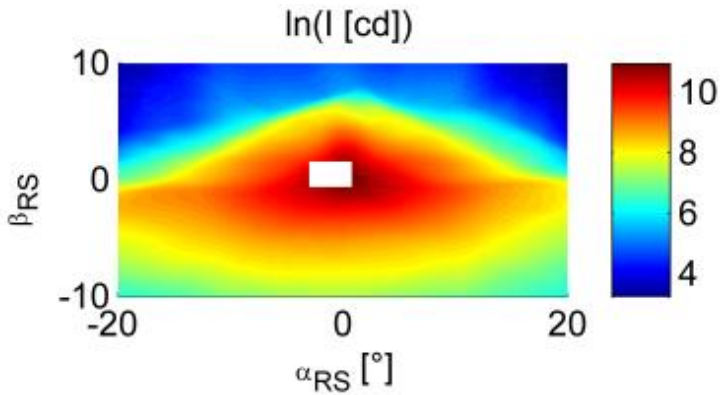
Auf Basis dieser Lichtverteilungen sind für die Matrix Scanner und die Matrix-DMD-Technologien die mittlere optische Leistung  $P_{\text{mean}}$ , die maximale optische Leistung  $P_{\text{max}}$  und die vom Wirkungsgrad der Laserdiode  $\eta_{\text{WPE}}$  abhängige Leistung  $P_{\text{el}}$  zu berechnen. Der ebenfalls zu berechnende Nutzungsgrad der Matrix-DMD-Technologie  $K_{\text{DMD}}$ , entspricht der Absorptionsrate, die das An-Aus-Verhältnis der einzelnen Mikrospiegel beschreibt. Der Nutzungsgrad ist abhängig von der Lichtfunktion.



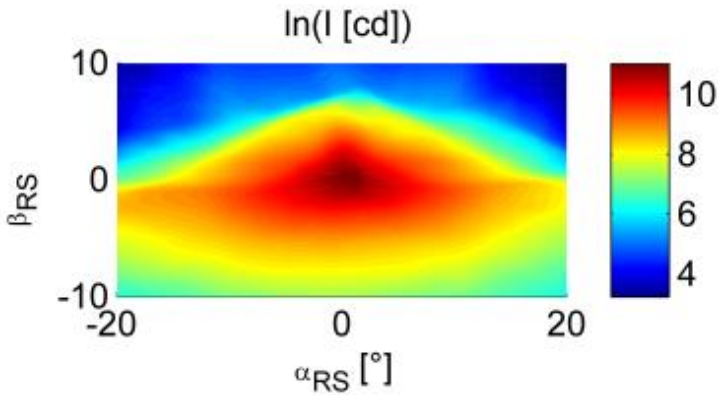
**Abbildung 4.3:** Darstellung der Lichtverteilung eines Abblendlichts; Funktion 1.



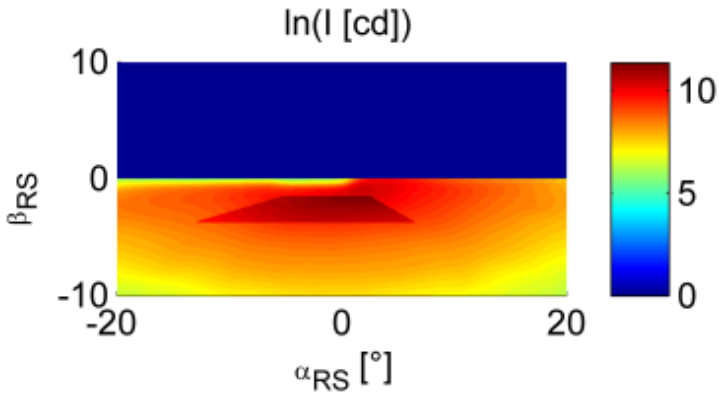
**Abbildung 4.4:** Darstellung der Lichtverteilung eines Abblend- und Fernlichts; Funktion 2.



**Abbildung 4.5:** Darstellung der Lichtverteilung eines blendfreien Fernlichts; Funktion 3.



**Abbildung 4.6:** Darstellung der Lichtverteilung eines Markierungslichts; Funktion 4.



**Abbildung 4.7:** Darstellung der Lichtverteilung einer adaptiven Abblendlichtfunktion; Funktion 5.

Bei der Matrix-Scanner-Technologie gibt der zu berechnende Nutzungsgrad  $K_{Sca}$  das Verhältnis von der vorzuhaltenden

optischen Leistung  $P_{\max}$ , zu der im Mittel benötigten optischen Leistung  $P_{\text{mean}}$  an. Er ist abhängig von der Betriebsart und der Lichtfunktion. Ein hoher Nutzungsgrad  $K_{\text{Sca}}$  reduziert dementsprechend die vorzuhaltende optische Leistung.

Die Systemwirkungsgrade, die Konversionsrate und der Wirkungsgrad der Laserdioden kann Kapitel 4.1 entnommen werden. Für ein aussagefähiges Ergebnis ist bei der Matrix-Scanner-Technologie die Spotgröße zu berücksichtigen. Wird der scannende Spot als Punktlichtquelle angenommen, sind in Abhängigkeit der Betriebsart und der Frequenzverhältnisse, Bereiche der Lichtverteilung nicht von der Ausleuchtung des Spots abgedeckt. Dies würde wiederum in einer unendlich hohen optischen Leistung resultieren. Aus diesem Grund wird an Stelle einer Punktlichtquelle ein Spot mit einem Gaußprofil verwendet. In den Berechnungen wird auf eine ein- und zweidimensionale Gaußfunktion zurückgegriffen. Für ein eindimensionales Spotprofil wird eine Normalverteilung gemäß Formel (4.1) verwendet:

$$g(\alpha_{RS}) = \frac{1}{\sigma_{\alpha_{RS}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{RS}-\mu_{\alpha_{RS}}}{\sigma_{\alpha_{RS}}}\right)^2} \quad (4.1)$$

Der Mittelpunkt der Gaußfunktion, auch Erwartungswert  $\mu_{\alpha_{RS}}$  genannt, wird im späteren Verlauf in Abhängigkeit der Bewegungsgleichungen verschoben. Der Wert der Gaußfunktion  $g$  ändert sich in Abhängigkeit der Variable  $\alpha_{RS}$ . Die Gaußverteilung ist normalisiert. Somit ergibt die Summe aller Werte gemäß Formel (4.2) den Wert eins.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\alpha_{RS}) d\alpha_{RS} = 1 \quad (4.2)$$

Die Standardabweichung  $\sigma_{\alpha_{RS}}$  wird auf  $0,25^\circ$  gesetzt. Aus dieser Angabe kann die Halbwertsbreite, im Englischen auch „Full Width at Half Maximum“ (FWHM) genannt, berechnet werden, die sich aus der Standardabweichung  $\sigma_{\alpha_{RS}}$  ergibt. Die Formel (4.3), ergibt sich durch eine einfache Berechnung, kann aber auch der Arbeit von Weisstein [WEI02] entnommen werden.

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \cdot \sigma = 2,3548 \cdot \sigma \quad (4.3)$$

Für ein zweidimensionales Spotprofil ist die Gaußfunktion gemäß Gleichung (4.4) beschrieben:

$$g(\alpha_{RS}, \beta_{RS}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\alpha_{RS}}\sigma_{\beta_{RS}}} e^{-\left(\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{RS}-\mu_{\alpha_{RS}}}{\sigma_{\alpha_{RS}}}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_{RS}-\mu_{\beta_{RS}}}{\sigma_{\beta_{RS}}}\right)^2\right)} \quad (4.4)$$

Das Gaußprofil wird symmetrisch betrachtet, wobei  $\sigma_{\beta_{RS}}$  ebenfalls auf  $0,25^\circ$  gesetzt wird.

Zur Berechnung der Leistungen werden die oben dargestellten unterschiedlichen Lichtfunktionen zunächst diskretisiert und, wie in Gleichung (4.5) zu sehen ist, in eine Lichtstärkematrix I überführt. Die horizontale  $\alpha_{Res}$  und vertikale  $\beta_{Res}$  Diskretisierungsauflösung beträgt  $0,1^\circ$ . Mit den oben erwähnten Öffnungswinkeln ergeben sich somit in horizontaler Richtung eine Pixelanzahl von  $n = 400$  und in vertikaler Richtung eine Pixelanzahl von  $m = 200$ .



$$I = \begin{pmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m1} & I_{m2} & \cdots & I_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Die Lichtstärkematrix  $I$  kann unter Beachtung der Raumwinkelmatrix, dargestellt in Gleichung (4.7), in die Lichtstrommatrix  $\Phi$  aus Gleichung (4.6) umgerechnet werden.

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{m1} & \Phi_{m2} & \cdots & \Phi_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \cdots & \Omega_{1n} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & \cdots & \Omega_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Omega_{m1} & \Omega_{m2} & \cdots & \Omega_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

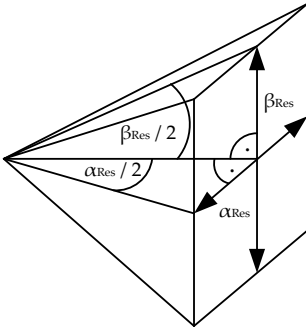
Die Matrix  $\Omega$  beinhalten die Raumwinkel für jedes Pixel  $a_{ij}$  mit  $i = 1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, n$ . Sie berechnen sich, gemäß Formel (4.8) und Abbildung 4.8 über den Raumwinkel einer Pyramide. Eine Fernfeldnäherung wird hierfür vorausgesetzt. Dies ist bei einem Lambert Emitter dann der Fall, wenn die Entfernung zur Lichtquelle dem zehnfachem Radius der Lichtquelle entspricht, was auch der Arbeit von Moreno [MOR08] entnommen werden kann.

$$\Omega_{i,j} = 4 \cdot \arcsin\left(\sin \frac{\alpha_{Res}}{2} \cdot \sin \frac{\beta_{Res}}{2}\right) \quad (4.8)$$

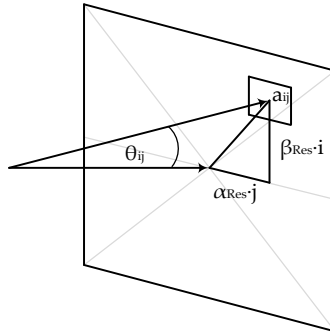
mit  $i = 1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, n$

Diese Berechnung gilt nur für den Pixel welcher senkrecht von der Flächennormalen durchstoßen wird. Die Berechnung der Pixel  $a_{ij}$  mit  $i=1, \dots, m$ , und  $j = 1, \dots, n$  werden deshalb durch einen Kosinus Faktor korrigiert. Der Winkel  $\theta_{ij}$ , zwischen der Flächennormalen

und dem Pixel  $a_{ij}$  berechnet sich für alle  $\theta_{ij}$  mit  $i=1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, n$  gemäß Gleichung (4.9).



**Abbildung 4.8:** Darstellung eines Pixels  $a_{ij}$  und dessen Winkelgrößen.



**Abbildung 4.9:** Darstellung des Winkels zwischen der Flächennormalen und einem Pixel  $a_{ij}$ .

$$\theta_{ij} = \sqrt{(\alpha_{Res} \cdot i)^2 + (\beta_{Res} \cdot j)^2} \quad (4.9)$$

Diese Gleichung kann in die Gleichung (4.8) eingesetzt werden. Daraus resultiert die Gleichung (4.10):

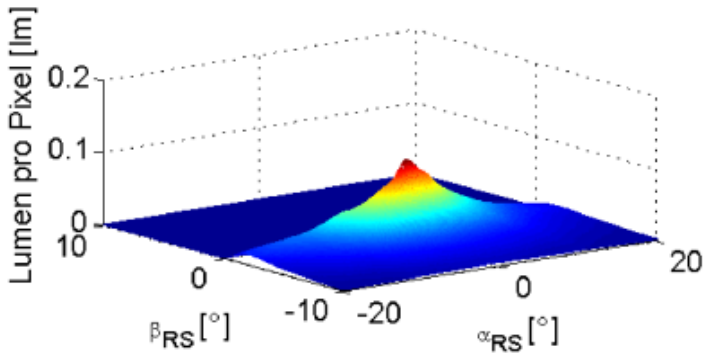
$$\Omega_{i,j} = 4 \cdot \arcsin\left(\sin \frac{\alpha_{Res}}{2} \cdot \sin \frac{\beta_{Res}}{2}\right) \cdot \cos(\theta_{ij}) \quad (4.10)$$

mit  $i = 1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, n$

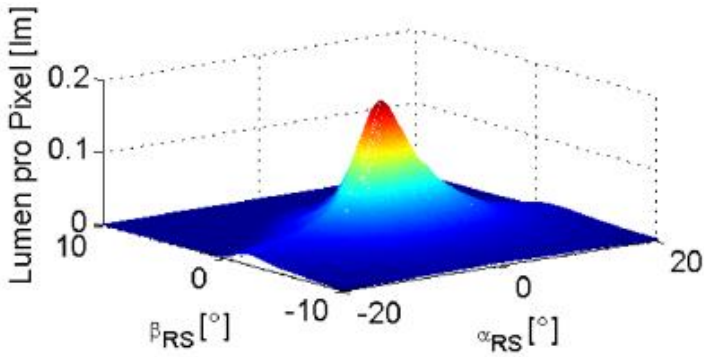
Jetzt lässt sich die Lichtstrommatrix  $\Phi$  berechnen. Diese ergibt sich aus dem Hadamard Produkt der Lichtstärke- und der Raumwinkelmatrix.

$$\phi = \begin{vmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m1} & I_{m2} & \dots & I_{mn} \end{vmatrix} \circ \begin{vmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \dots & \Omega_{1n} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & \dots & \Omega_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Omega_{m1} & \Omega_{m2} & \dots & \Omega_{mn} \end{vmatrix} \quad (4.11)$$

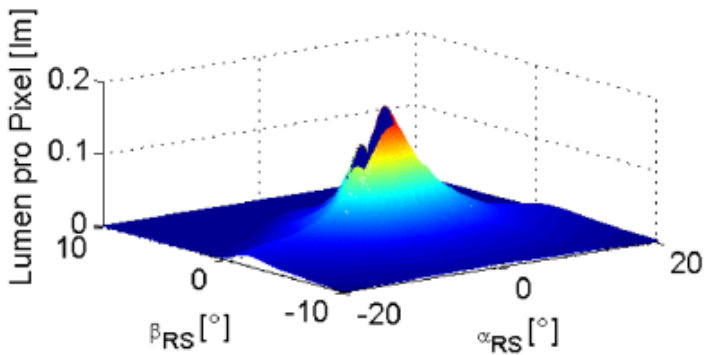
Die aus der Berechnung resultierenden Lichtstrommatrizen sind in den Abbildungen 4.10 bis 4.14 zu sehen.



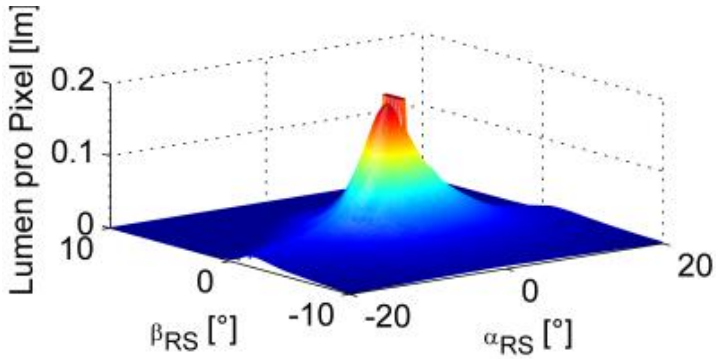
**Abbildung 4.10:** Darstellung der Lichtstrommatrix eines Abblendlichts, Funktion 1.



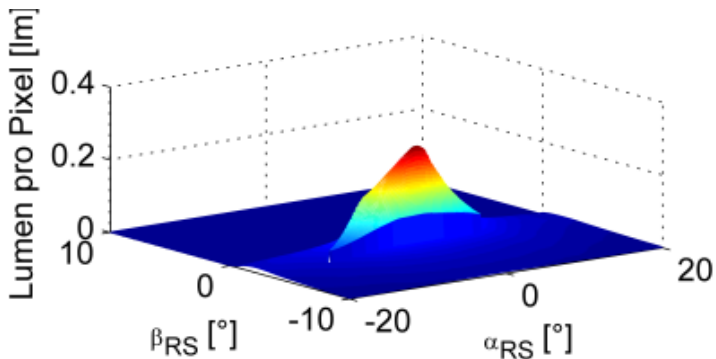
**Abbildung 4.11:** Darstellung der Lichtstrommatrix eines Ablend- und Fernlichts, Funktion 2.



**Abbildung 4.12:** Darstellung der Lichtstrommatrix eines blendfreien Fernlichts, Funktion 3.



**Abbildung 4.13:** Darstellung der Lichtstrommatrix eines Markierungslichts, Funktion 4.

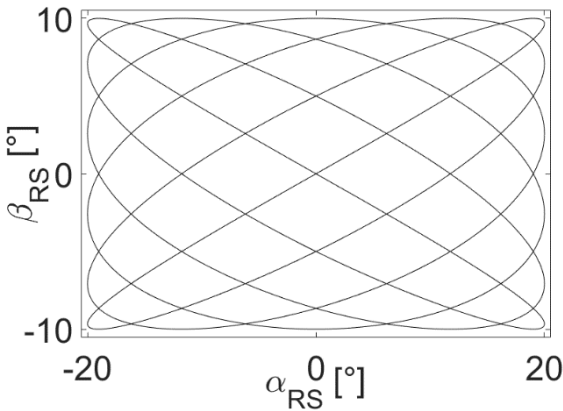


**Abbildung 4.14:** Darstellung der Lichtstrommatrix einer adaptiven Abblendlichtfunktion, Funktion 5.

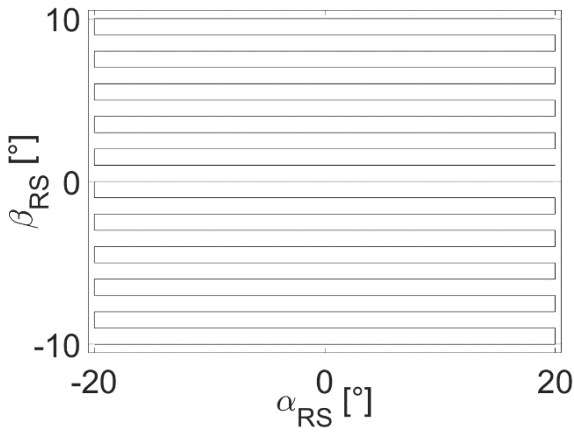
#### 4.2.1 STRAHLGEFÜHRTER ANSATZ

Im strahlgeführten Ansatz wird eine Lichtverteilung erzeugt indem ein Laserstrahl in zwei Dimensionen abgelenkt wird. Die Modulierbarkeit der Laserdiode und die in Abhängigkeit der Ablenkeinheit zu berücksichtigende maximale Beschleunigung, sind in dem hier gewählten Modell nicht mit einberechnet.

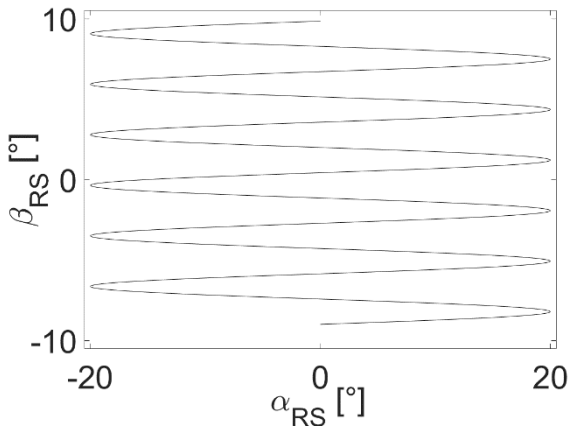
Zur Abschätzung der benötigten optischen Leistung werden drei Betriebsarten betrachtet. Im „resonant 2D“ Betrieb erfolgt die Strahlablenkung in zwei Achsen resonant. Im „quasistatisch 2D“ Betrieb wird der Laserstrahl in zwei Achsen quasistatisch abgelenkt.



**Abbildung 4.15:** Beispielhafter Scanverlauf eines Laserspots im resonant 2D Betrieb.



**Abbildung 4.16:** Beispielhafter Scanverlauf eines Laserspots im quasistatisch 2D Betrieb.



**Abbildung 4.17:** Beispielhafter Scanverlauf eines Laserspots im resonant / quasistatischer Betrieb.

Im „resonant/quasistatischer“ Betrieb wird die Ablenkeinheit in einer Achse resonant und in einer Achse quasistatisch betrieben. In den Abbildungen 4.15, 4.16 und 4.17 sind mögliche Bewegungsmuster aller drei Betriebsarten abgebildet.

### 4.2.1.1 RESONANT 2D BETRIEB

Im „resonant 2D“ Betrieb folgen die Winkelpositionen  $\alpha_{RS}$  und  $\beta_{RS}$  der Bewegungsgleichung eines harmonischen Oszillators, welche in den Gleichungen (4.12) und (4.13) beschrieben ist.

$$\alpha_{RS}(t) = \frac{\alpha_d}{2} \cdot \sin((2\pi t) \cdot f_\alpha) \quad (4.12)$$

$$\beta_{RS}(t) = \frac{\beta_d}{2} \cdot \sin((2\pi t) \cdot f_\beta) \quad (4.13)$$

Der Winkel  $\alpha_d$  ist der horizontale Öffnungswinkel des Scheinwerfers und beträgt  $40^\circ$ . Der vertikale Öffnungswinkel  $\beta_d$  beträgt  $20^\circ$ . Die Amplitude ist so zu wählen, dass der Öffnungswinkel vollständig abgedeckt ist. Der Parameter  $f_\alpha$  ist die horizontale und  $f_\beta$  die vertikale Scanfrequenz. Abhängig vom gewählten Frequenzverhältnis  $f_\alpha / f_\beta$  ergeben sich unterschiedliche Lissajous-Figuren, wobei große Frequenzverhältnisse zu bevorzugen sind, da diese eine größere Fläche auf dem abgescannten Bereich abdecken. In dem in dieser Arbeit verwendeten Modell zur Leistungsabschätzung wird das Frequenzverhältnis auf 400:11 gesetzt. Es muss berücksichtigt werden, dass im realen Betrieb die Frequenzen und



somit auch das Frequenzverhältnis von den Resonanzfrequenzen des Mikrospiegels abhängig ist.

Zur Berechnung der Leistungen muss zunächst, die in Gleichung (4.14) dargestellte Aufenthaltszeitmatrix  $T_{\text{auf\_2Dres}}$  erstellt werden. Diese gibt alle Aufenthaltszeiten  $t_{ij}$  innerhalb eines Pixels  $a_{ij}$  mit  $i=1, \dots, m$  und  $j=1, \dots, n$  an.

$$T_{\text{auf\_2Dres}} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \text{ mit } \forall t_{ij} \in [0,1] \quad (4.14)$$

Die Aufenthaltszeiten sind normalisiert und somit entspricht die Summe aller Aufenthaltszeiten gemäß Gleichung (4.15) dem Wert eins.

$$t_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [t_{ij}] = 1 \quad (4.15)$$

Die Normalisierung erfolgt gemäß Formel (4.16), indem jedes Element  $t_{ij}$ , mit  $i=1, \dots, m$  und  $j=1, \dots, n$ , durch die Summe aller Elemente dividiert wird.

$$t_{ij} = \frac{t_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [t_{ij}]} \quad (4.16)$$

Für die Berechnung der Elemente  $t_{ij}$  der Matrix  $T_{\text{auf\_2Dres}}$  werden die Bewegungsgleichungen (4.12) und (4.13) in die Gleichung (4.4) eingesetzt. Daraus ergibt sich die Gleichung (4.17).

$$g(\alpha_{RS}, \beta_{RS}, t) = \quad (4.17)$$

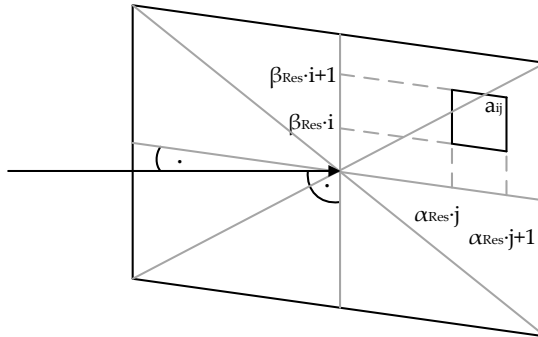
$$\frac{1}{2\pi\sigma_{\alpha_{RS}}\sigma_{\beta_{RS}}} e^{-\left(\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{RS}-\frac{\alpha_d}{2}\sin((2\pi t)\cdot f\alpha)}{\sigma_{\alpha_{RS}}}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_{RS}-\frac{\beta_d}{2}\sin((2\pi t)\cdot f\beta)}{\sigma_{\beta_{RS}}}\right)^2\right)}$$

Der Mittelpunkt variiert jetzt abhängig von der Zeit  $t$  und dem Frequenzverhältnis  $f_\alpha / f_\beta$ . Die Zeit ist hierbei so gewählt, dass ein kompletter Scandurchlauf betrachtet wird. Dafür nimmt  $t$  Werte zwischen 0 und 1 mit einer Auflösung von 0,001 an. Die Elemente  $t_{ij}$  der Matrix  $T_{\text{auf\_2Dres}}$  lassen sich gemäß der Gleichung (4.20) berechnen:

$$t_{ij} = \int_{\alpha_{Res:j}}^{\alpha_{Res:(j+1)}} \int_{\beta_{Res:i}}^{\beta_{Res:(i+1)}} g(\alpha_{RS}, \beta_{RS}) d\alpha_{RS} \cdot d\beta_{RS} \quad (4.18)$$

Mit  $i = 0, \dots, m-1$  und  $j = 0, \dots, n-1$ .

Die Werte  $\alpha_{Res}$  und  $\beta_{Res}$  entsprechen hierbei der horizontalen und vertikalen Diskretisierungsauflösung. Die Integrationsgrenzen sind in Abbildung 4.18 dargestellt.



**Abbildung 4.18:** Darstellung der Integrationsgrenzen für die Berechnung der Aufenthaltszeit innerhalb eines Pixels  $a_{ij}$ .

Die Berechnung der Aufenthaltszeit jedes Pixels erfolgt innerhalb der jeweiligen Integrationsgrenzen dieses Pixels mittels Aufsummierung der Funktionswerte aus Gleichung (4.20) zu jedem definierten Zeitpunkt  $t$ .

Ist die Aufenthaltszeitmatrix bestimmt kann die Leistungsberechnung erfolgen. Die Maximalleistung  $P_{\max}$  kann gemäß Gleichung (4.19) berechnet werden, indem das Pixel, welches das größte Verhältnis zwischen Lichtstrom und der Aufenthaltszeit aufweist, durch den Systemwirkungsgrad und die Konversionsrate dividiert wird.

$$P_{max} = \frac{1}{\eta_{Str\_Sys} \cdot R} \cdot \max \left( \begin{array}{c} \frac{\Phi_{11}}{t_{11}} \quad \frac{\Phi_{12}}{t_{12}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{1n}}{t_{1n}} \\ \frac{\Phi_{21}}{t_{21}} \quad \frac{\Phi_{22}}{t_{22}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{2n}}{t_{2n}} \\ \vdots \\ \frac{\Phi_{m1}}{t_{m1}} \quad \frac{\Phi_{m2}}{t_{m2}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{mn}}{t_{mn}} \end{array} \right) \quad (4.19)$$

Zur Bestimmung der mittleren Leistung  $P_{mean}$  sind die Lichtstromwerte  $\Phi_{ij}$  gemäß Gleichung (4.20) aufzusummieren.

$$\Phi_{sum} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\Phi_{ij}] \quad (4.20)$$

Abschließend ist  $P_{mean}$  bestimmbar, wenn die Summe aller Lichtströme  $\Phi_{sum}$  durch den Systemwirkungsgrad  $\eta_{Sca\_Sys}$  sowie die Konversionsrate  $R$  dividiert wird.

$$P_{mean} = \frac{\Phi_{sum}}{\eta_{Str\_Sys} \cdot R} \quad (4.21)$$

Der Nutzungsgrad der Matrix-Scanner-Technologie im „resonant 2D Betrieb“  $K_{Sca}$  berechnet sich zu:

$$K_{Sca} = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (4.22)$$

#### 4.2.1.2 QUASISTATISCHER 2D BETRIEB

Im „quasistatischen 2D“ Betrieb wird der Laserstrahl in zwei Achsen quasistatisch abgelenkt. Durch die oben erwähnte „ideale“ Betrachtung ist die Ablenkbewegung im quasistatischen Betrieb

unendlich schnell. In diesem theoretischen Ansatz können die Aufenthaltszeiten dann beliebig gewählt werden. Somit kann die mittlere optische Leistung  $P_{\text{mean}}$  mit der maximalen optischen Leistung  $P_{\text{max}}$  gleichgesetzt werden, da die Lichtverteilung allein durch die Modulation der Aufenthaltszeit bestimmt wird. Die Aufenthaltszeitmatrix  $T_{\text{auf\_2DQua}}$ , die die Zeitverhältnisse jedes Pixels  $t_{ij}$  mit  $i = 1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, n$  angibt, kann direkt aus dem Verhältnis des Lichtstroms eines Pixel  $\Phi_{ij}$  zum Gesamtlichtstrom  $\Phi_{\text{sum}}$  berechnet werden.

$$T_{\text{auf\_2DQua}} = \begin{pmatrix} \frac{\Phi_{11}}{\Phi_{\text{sum}}} & \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{\text{sum}}} & \dots & \frac{\Phi_{1n}}{\Phi_{\text{sum}}} \\ \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{\text{sum}}} & \frac{\Phi_{22}}{\Phi_{\text{sum}}} & \dots & \frac{\Phi_{2n}}{\Phi_{\text{sum}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Phi_{m1}}{\Phi_{\text{sum}}} & \frac{\Phi_{m2}}{\Phi_{\text{sum}}} & \dots & \frac{\Phi_{mn}}{\Phi_{\text{sum}}} \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Der Gesamtlichtstrom  $\Phi_{\text{sum}}$  berechnet sich bei dieser Betriebsart nach Gleichung (4.20). Die Leistungen  $P_{\text{mean}}$  sowie  $P_{\text{max}}$  sind gemäß Gleichung (4.24) direkt aus dem Gesamtlichtstrom welcher durch die Systemeffizienz  $\eta_{\text{Sca\_Sys}}$  und die Konversionsrate  $R$  dividiert wird, berechenbar.

$$P_{\text{mean}} = P_{\text{max}} = \frac{1}{\eta_{\text{Str\_Sys}} \cdot R} \cdot \Phi_{\text{sum}} \quad (4.24)$$

Der Nutzungsgrad  $K_{\text{Sca}}$  beträgt bei dieser Betriebsart 100 %.

#### 4.2.1.3 RESONANT/QUASISTATISCHER BETRIEB

Der „resonant/quasistatischer“ Betrieb ist ein Mischbetrieb. Das bedeutet, dass die Ablenkeinheit in einer Achse resonant und in der zweiten Achse quasistatisch angetrieben wird. In dieser Arbeit erfolgt der Bildaufbau zeilenweise und deshalb ist die vertikale Achse quasistatisch betrieben. Dieser Betrieb führt dazu, dass keine Lissajous Figuren entstehen können, da hierfür die Überlagerung von zwei harmonischen Schwingungen notwendig ist.

Die Berechnung der Aufenthaltszeitmatrix erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der in Gleichung (4.26) dargestellte horizontale Aufenthaltszeitvektor  $t_{auf\_hor}$  bestimmt.

$$t_{auf\_hor} = [t_{auf\_hor1}, t_{auf\_hor2} \dots t_{auf\_horn}] \quad (4.25)$$

Für die Berechnung der Elemente des Vektors wird die Gleichung (4.1) einer eindimensionalen Gaußverteilung verwendet und die Bewegungsgleichung (4.12) in horizontaler Richtung eingesetzt. Daraus folgt die Gleichung (4.29):

$$g(\alpha_{RS}) = \frac{1}{\sigma_{\alpha_{RS}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_{RS} - \frac{\alpha_d}{2} \sin((2\pi t) \cdot f \alpha)}{\sigma_{\alpha_{RS}}} \right)^2} \quad (4.26)$$

Der horizontale Aufenthaltszeitvektor ist gemäß Formel (4.30) berechenbar.

$$t_{auf\_hor\ j} = \int_{\alpha_{Res\ j}}^{\alpha_{Res\ (j+1)}} g(\alpha_{RS}) d\alpha_{RS} \quad (4.27)$$

mit  $j = 0, \dots, n-1$ .

Nach der Berechnung des horizontalen Aufenthaltszeitvektors ist daraus der in Gleichung (4.28) dargestellte vertikale Aufenthaltszeitvektor bestimmbar.

$$t_{auf\_ver} = \begin{bmatrix} t_{auf\_ver\_max1} \\ t_{auf\_ver\_max2} \\ \vdots \\ t_{auf\_ver\_maxm} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Der Vektor  $t_{auf\_ver}$  wird ermittelt, indem die Zeilen-Maximalwerte der Verhältnisse von der Lichtstrommatrix  $\Phi$  zu dem horizontalen Aufenthaltszeitvektor  $t_{auf\_hor}$  gemäß Gleichung (4.25) berechnet werden.

$$t_{auf\_ver} = \begin{bmatrix} \max \left[ \frac{\Phi_{11}}{t_{auf\_hor1}} \quad \frac{\Phi_{12}}{t_{auf\_hor2}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{1n}}{t_{auf\_horn}} \right] \\ \max \left[ \frac{\Phi_{21}}{t_{auf\_hor1}} \quad \frac{\Phi_{22}}{t_{auf\_hor2}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{2n}}{t_{auf\_horn}} \right] \\ \vdots \\ \max \left[ \frac{\Phi_{m1}}{t_{auf\_hor1}} \quad \frac{\Phi_{m2}}{t_{auf\_hor2}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{mn}}{t_{auf\_horn}} \right] \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Die Aufenthaltszeitmatrix  $T_{auf\_res/qua}$  ergibt sich gemäß Gleichung (4.30) aus dem Matrixprodukt der horizontalen Bewegungsgleichung eines harmonischen Oszillators, welche im Zeitvektor  $t_{auf\_hor}$  hinterlegt ist, und dem vertikalen Zeitvektor  $t_{auf\_ver}$ . Die Normalisierung der Aufenthaltszeitmatrix erfolgt gemäß Gleichung (4.16).

$$\begin{aligned}
 T_{auf\_res/qua} &= \begin{vmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{vmatrix} = t_{auf\_ver} \cdot t_{auf\_hor} \\
 &= \begin{vmatrix} t_{auf\_ver1} \\ t_{auf\_ver2} \\ \vdots \\ t_{auf\_verm} \end{vmatrix} \cdot [t_{auf\_hor1} \ t_{auf\_hor2} \ \cdots \ t_{auf\_horn}]
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Die maximale optische Leistung  $P_{max}$  ist nach Gleichung (4.19) zu berechnen. Sie ergibt sich aus dem Maximalwert des größten Verhältnisses von Lichtstrom zur Aufenthaltszeit, dividiert durch den Systemwirkungsgrad und die Konversionsrate. Die mittlere optische Leistung ergibt sich aus der Summe aller Lichtströme dividiert durch den Systemwirkungsgrad sowie die Konversionsrate und wird gemäß Gleichung (4.21) berechnet. Der Nutzungsgrad  $K_{Sca}$  in dieser Betriebsart ist aus Gleichung (4.31) bestimmbar.

$$K_{Sca} = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \tag{4.31}$$

#### 4.2.2 FLÄCHENMODULIERTER ANSATZ

Unabhängig von der tatsächlichen Auflösung und dem Seitenverhältnis des in diesem Modell betrachteten flächenmodulierten Systems, beträgt die horizontale und vertikale Diskretisierungsauflösung  $\alpha_{Res}$  und  $\beta_{Res} = 0,1^\circ$ . Der DMD Spiegel wird von der laserbasierten Lichtquelle homogen ausgeleuchtet und Verzeichnungen am Rand der Abbildung werden vernachlässigt.



Es ist offensichtlich, dass bei einem flächenmodulierten System die mittlere Leistung  $P_{\text{mean}}$  gleich der maximalen Leistung  $P_{\text{max}}$  ist, da die Intensität eines Pixels nicht über die Aufenthaltszeit beeinflusst werden kann und somit bei einem An-Aus-Verhältnis von eins jeder Pixel den gleichen Lichtstrom aufweist. Die benötigte maximale optische Leistung  $P_{\text{max}}$  ist bei einer homogenen Ausleuchtung des DMD Spiegels direkt proportional zum Maximalwert der in Gleichung (4.32) dargestellten Lichtstrommatrix  $\Phi_{\text{max}}$ .

$$\Phi_{\text{max}} = \max \begin{vmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{m1} & \Phi_{m2} & \cdots & \Phi_{mn} \end{vmatrix} \quad (4.32)$$

Die Berechnung der mittleren und maximalen optischen Leistungen erfolgt gemäß Gleichung (4.33):

$$P_{\text{mean}} = P_{\text{max}} = \frac{1}{R \cdot \eta_{\text{DMD-Sys}}} \Phi_{\text{max}} \cdot m \cdot n \quad (4.33)$$

Um den Nutzungsgrad  $K_{\text{DMD}}$  zu berechnen ist für jedes Pixel das von der Dimmung abhängige An-Aus-Verhältnis jedes Pixels  $K_{i,j}$  mit  $i = 1, \dots, m$  und  $j = 1, \dots, n$  zu bestimmen.

Dazu wird die Lichtstrommatrix  $\Phi$  durch den oben ermittelten Maximalwert  $\Phi_{\text{max}}$  gemäß Gleichung (4.34) dividiert. Anschließend ergibt sich daraus eine Matrix  $A$ , die das An-Aus-Verhältnis beziehungsweise den Pixelnutzungsgrad beinhaltet.

$$A = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{m1} & K_{m1} & \dots & K_{mn} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \dots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{m1} & \Phi_{m2} & \dots & \Phi_{mn} \end{bmatrix}}{\Phi_{max}} \quad (4.34)$$

Der Nutzungsgrad  $K_{DMD}$  lässt sich durch die Aufsummierung des Nutzungsgrads aller Pixel, dividiert durch die Gesamtzahl der Pixel ermitteln, wie aus Formel (4.35) ersichtlich ist.

$$K_{DMD} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij}}{m \cdot n} \quad (4.35)$$

### 4.3 DISKUSSION UND TECHNOLOGIEAUSWAHL

Unter Berücksichtigung der hergeleiteten Gleichungen ergeben sich die Werte in Tabelle 4.4, welche die berechneten optischen Leistungen sowie den Nutzungsgrad für jede der eingangs erwähnten fünf Lichtfunktionen beinhaltet.

Ausgehend von der durchgeführten Simulation zeigen sich deutliche Unterschiede in den berechneten optischen Leistungen und dem Nutzungsgrad. Ein strahlgeführtes System mit zwei resonanten Achsen weist aufgrund des Schwingungsverhaltens eines harmonischen Oszillators bei  $\alpha_{RS} = 0^\circ$  die kürzeste Aufenthaltszeit auf. Da in diesem zentralen Bereich die Lichtstärke jedoch am höchsten ist resultiert daraus eine maximale optische Leistung von über 500 W. Zusätzlich können, je nach eingestelltem Frequenzver-

hältnis, Lissajous-Figuren auftreten, welche einer optimalen Ausleuchtung entgegenstehen. Durch den Austausch einer resonanten Achse mit einer quasistatischen Achse kann die Ausleuchtung optimiert werden. Außerdem ist die maximale optische Leistung um den Faktor 2, auf unter 200 W reduzierbar. Gleichzeitig steigt der Nutzungsgrad, da das Verhältnis zwischen vorzuhaltender und im Mittel abgerufener optischen Leistungen kleiner wird. Der Betrieb mittels zweier quasistatischer Achsen hat die höchsten Freiheitsgrade und die Lichtstärkeinstellung erfolgt einzig und allein durch die Steuerung der Aufenthaltszeiten. Dadurch ist in dem hier gewählten theoretischen Modell ein Nutzungsgrad von 100 % erzielbar.

**Tabelle 4.4:** Darstellung der optische Leistungen und des Nutzungsgrads in Abhängigkeit der Technologie und der Betriebsart für Lichtfunktion 1 „Abblendlicht“, Lichtfunktion 2 „Abblend- und Fernlicht“, Lichtfunktion 3 „blendfreie Fernlicht“, Lichtfunktion 4 „Markierungslicht“ und Lichtfunktion 5 „adaptives Abblendlicht“.

		Lichtfunktion				
		1.	2.	3.	4.	5.
Technologie	Res 2D	$K_{sca} = 7.1\%$	$K_{sca} = 7.15\%$	$K_{sca} = 6.8\%$	$K_{sca} = 6.6\%$	$K_{sca} = 3.7\%$
		$P_{max} = 240W$	$P_{max} = 431W$	$P_{max} = 410W$	$P_{max} = 466W$	$P_{max} = 634W$
		$P_{mean} = 17W$	$P_{mean} = 31W$	$P_{mean} = 28W$	$P_{mean} = 31W$	$P_{mean} = 24W$
		$P_{ei} = 61W$	$P_{ei} = 111W$	$P_{ei} = 100W$	$P_{ei} = 111W$	$P_{ei} = 86W$
	Qua 2D	$K_{sca} = 100\%$	$K_{sca} = 100\%$	$K_{sca} = 100\%$	$K_{sca} = 100\%$	$K_{sca} = 100\%$
		$P_{max} = 17W$	$P_{max} = 31W$	$P_{max} = 28W$	$P_{max} = 31W$	$P_{max} = 24W$
		$P_{mean} = 17W$	$P_{mean} = 31W$	$P_{mean} = 28W$	$P_{mean} = 31W$	$P_{mean} = 24W$
		$P_{ei} = 61W$	$P_{ei} = 111W$	$P_{ei} = 100W$	$P_{ei} = 111W$	$P_{ei} = 86W$
	Res/Qua	$K_{sca} = 24.6\%$	$K_{sca} = 17.4\%$	$K_{sca} = 16.2\%$	$K_{sca} = 17\%$	$K_{sca} = 20\%$
		$P_{max} = 70W$	$P_{max} = 176W$	$P_{max} = 174W$	$P_{max} = 183W$	$P_{max} = 119W$
		$P_{mean} = 17W$	$P_{mean} = 31W$	$P_{mean} = 28W$	$P_{mean} = 31W$	$P_{mean} = 24W$
		$P_{ei} = 61W$	$P_{ei} = 111W$	$P_{ei} = 100W$	$P_{ei} = 111W$	$P_{ei} = 86W$
DMD	$K_{DMD} = 8.4\%$	$K_{DMD} = 8.5\%$	$K_{DMD} = 8.1\%$	$K_{DMD} = 8.2\%$	$K_{DMD} = 4.5\%$	
	$P_{max} = 201W$	$P_{max} = 360W$	$P_{max} = 347W$	$P_{max} = 377W$	$P_{max} = 533W$	
	$P_{mean} = 201W$	$P_{mean} = 360W$	$P_{mean} = 347W$	$P_{mean} = 377W$	$P_{mean} = 533W$	
	$P_{ei} = 718W$	$P_{ei} = 1286W$	$P_{ei} = 1239W$	$P_{ei} = 1346W$	$P_{ei} = 1904W$	

Im flächenmodulierten System ist der Nutzungsgrad von der Lichtverteilung abhängig. Da der Nutzungsgrad im flächenmodulierten System der Absorptionsrate entspricht, muss diese Leistung nicht nur vorgehalten, sondern auch kontinuierlich abgerufen werden. Somit wird in Abhängigkeit der Lichtfunktion über 95 % des Lichts absorbiert. Eine Optimierungsmöglichkeit bietet die inhomogene Ausleuchtung des DMDs, wie es auch in der Patent-

schrift [ROT14b] und der Veröffentlichung auf der VDI Tagung „Optische Technologien im Kraftfahrzeug“ [GUT14c] zu lesen ist. Dies führt jedoch zu einer unflexiblen Lichtverteilung.

Der im Kapitel 4.1 durchgeführte Benchmark zeigt, dass die Stärken der Matrix-DMD-Technologie in einer kleinen, sekundären Optik und einer hohen Auflösung liegen. Der Systemwirkungsgrad ist bei der Matrix-DMD-Technologie im Vergleich zur Matrix-Scanner-Technologie um sechs Prozentpunkte höher. Des Weiteren hat die Matrix-Scanner-Technologie den Vorteil, dass die Lichtverteilung variabel einstellbar und der Mikrospiegelbetrieb unabhängig von der Temperatur ist. Zusätzlich sind bei einem quasistatischen Betrieb von mindestens einer Achse, die benötigten optischen Leistungen deutlich reduzierbar. Aufgrund dieser Vorteile und dem Aspekt der unkonventionellen Erzeugung einer Lichtverteilung auf einem Konverter, mittels eines von einem Mikrospiegel abgelenkten Laserstrahls, wird die Matrix-Scanner-Technologie in dieser Arbeit weiterverfolgt. Der quasistatische Betrieb von mindestens einer Achse benötigt eine hohe Stellkraft, welche von der Antriebsart abhängig ist. In Kapitel 7 wird die Antriebsart nach Festlegung der Parameter, der finalen Lichtverteilung und Lichtfunktion definiert.



---

## Kapitel 5

# INGRENZUNG DER PARAMETER

Es hat sich in der ersten Leistungsabschätzung gezeigt, dass selbst im quasistatischen 2D Betrieb die benötigte optische Leistung im Bereich von über 30 W liegt. Bei einer optischen Leistung von 2 W je Laserdiode würden hierfür mehr als 15 Laserdioden benötigt, was zu einem komplexen System mit entsprechenden Kosten führt. Deshalb werden im Rahmen dieses Kapitels die tatsächlichen Anforderungen für die Lichtfunktionen bestimmt, um anschließend die Anzahl der benötigten Laserdioden zu reduzieren.

## 5.1 GESETZLICHE ANFORDERUNGEN

Bei der Umsetzung von neuartigen Lichtfunktionen auf der Grundlage von hochaufgelösten Pixellichtsystemen, sind zwei Regelungen von wesentlicher Bedeutung. In der Regelung ECE R48 [WIR06] sind sowohl die Schaltbedingungen als auch die Anbauvorschriften beschrieben. Die Regelung ECE R123 [WIR13] gilt für Scheinwerfersysteme mit variabler Lichtverteilung, auch adaptive Frontbeleuchtungssysteme genannt. Sie umfasst sowohl die adaptiven Abblend- als auch Fernlichtfunktionen. Darüber hinaus

---

ist in Deutschland die Straßenverkehrsordnung (StVO) [BUN10] zu berücksichtigen. Diese hat einige Besonderheiten hinsichtlich der Nutzung der Kraftfahrzeugbeleuchtung. So ist in § 17, Absatz 2 definiert, dass auf Straßen mit durchgehender Beleuchtung nicht mit Fernlicht gefahren werden darf.

Weitere Regelungen in Bezug auf die Schaltbedingungen und Systemzustände sind in der bereits erwähnten ECE R48 beschrieben. So ist beispielsweise in § 6.1.7.3 festgelegt, dass Fernlichtfunktionen durch den Fahrer deaktivierbar sein müssen. Außerdem müssen die sogenannten AFS Funktionen gemäß § 6.22.7.6 durch eine einfache Schaltung abschaltbar sein. Dies kann durch die Änderung des Zustands des Lichtdrehhalters (LDS) in die Abblendlicht Stellung erfolgen. Eine Deaktivierungsmöglichkeit in einem Untermenü würde dieser Anforderung möglicherweise nicht genügen.

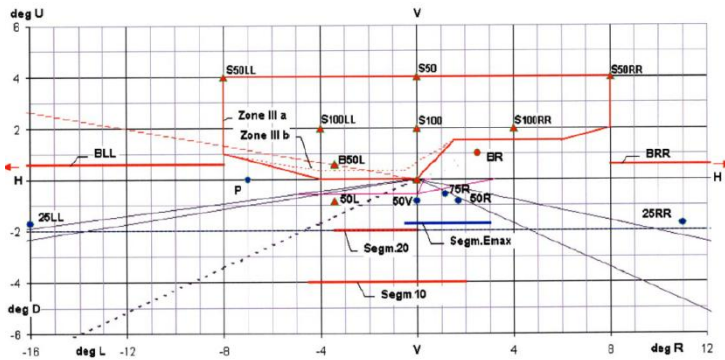
Die größte Lichtstärke des Fernlichts aller Scheinwerfer  $I_{vmax}$ , die gleichzeitig erzeugt werden darf, ist ebenfalls in der ECE R48 definiert und darf laut § 6.1.9.1 einen Wert von 430.000 cd nicht überschreiten. In der ECE R48 sind auch die Bedingungen für das sogenannte Begrüßungs- und Verabschiedungslicht festgelegt. Eine solche Funktion kann gemäß § 2.24 nur dann umgesetzt werden, wenn sich das Fahrzeug nicht im Rahmen der normalen Nutzungsbedingungen befindet und die verwendeten Lichtquellen einer genehmigten Abblend- oder Fernlichtfunktion zuzuordnen sind.

Die Regelung ECE R123 umfasst Vorschriften für das Abblend- und Fernlicht. Die Anforderungen an das Abblendlicht sind in



unterschiedliche Klassen unterteilt. Ein normales Abblendlicht, was auch dem "neutralen Zustand" entspricht, ist gemäß § 4.2.2.1 in Klasse C beschrieben und wird in diesem Zusammenhang auch als Landstraßenlicht bezeichnet. Die Abblendlicht-Klasse E umfasst ein Autobahnlicht, die Abblendlicht-Klasse V ein Stadtlicht und die Abblendlicht Klasse-W ein Schlechtwetterlicht. Für jede Klasse kann eine beliebige Anzahl an Unterklassen definiert werden. Nach § 6.2.4 ist zu berücksichtigen, dass jedes System ein Abblendlicht der Klasse C sowie einer oder mehrerer weiterer Klassen ausstrahlt. Außerdem darf am Messpunkt "B50L", zu sehen in Abbildung 5.1, eine Lichtstärke von 350 cd nicht überschritten werden. Dieser Messpunkt umfasst die sogenannte Blendschwelle. Bei der Klasse E und Klasse W ist auch eine maximale Lichtstärke von 625 cd möglich. Des Weiteren darf für das Abblendlicht im sogenannten Segment 10 eine Lichtstärke von 3550 cd und im Segment 20 eine Lichtstärke von 8800 cd nicht überschritten werden. Außerdem gilt, dass das Betätigen des „Abblendschalters“ den Wechsel zum Abblendlicht und das gleichzeitige Ausschalten sämtlicher Scheinwerfer für Fernlicht oder sämtlicher das Fernlicht erzeugender AFS-Leuchteinheiten bewirken muss. Die Anforderungen an das Fernlicht sind in der ECE R123 ebenfalls definiert. So sind beispielsweise die Grenzwerte der Tabelle 7 in der ECE R123 einzuhalten. Generell sind die photometrischen Grenzwerte für das Fernlicht höher als im Abblendlicht. Wenn somit Funktionen, die sich im Abblendlicht befinden, dem Fernlicht zugeordnet werden, wäre eine Überschreitung der Abblendlichtgrenzwerte möglicherweise zulässig. Jedoch muss, wie bereits erwähnt, die manuelle

Deaktivierbarkeit der Lichtfunktion durch eine einfache, sofortige Operation ohne Untermenü sichergestellt sein. Im § 6.22.7.6 ist zusätzlich beschrieben, dass der Fahrer jederzeit in der Lage sein muss, das System in einen neutralen Zustand zu bringen. Dies könnte beispielsweise mittels Deaktivierung der Lichtfunktionen über den Lenkstockhebel erfolgen. Für den Fall, dass ein Fehler im System auftritt sind laut Kapitel 5.7.3 in der ECE R123 doppelte Streulichtwerte zulässig.



**Abbildung 5.1:** Darstellung der Messpunkte gemäß ECE R123 [WIR13].

## 5.2 LICHTFUNKTIONEN

Das Potential laserbasierter hochauflösender Pixellichtsystemen liegt darin die Fahrzeugsicherheit zu verbessern, indem neue Abblendlichtfunktionen umgesetzt werden, welche das blendfreie Fernlicht optimieren. Im Folgenden sind diese Lichtfunktionen

beschrieben, um anschließend ermitteln zu können, welcher Öffnungswinkel und welche Auflösung notwendig sind, um die hier definierten Funktionen umsetzen zu können.

### 5.2.1 ADAPTIVE ABBLENDLICHTFUNKTIONEN

Es gibt drei mögliche Ansätze für den Einsatz von hochauflösenden Pixellichtsystemen für adaptive Abblendlichtfunktionen, wobei deren Zulassungsfähigkeit individuell zu prüfen ist.

- a.) Lichtassistenz und Lichtführung
- b.) Kommunikations- und Interaktionsfunktionen
- c.) Spezifische Lichtverteilung

Der erste Ansatz umfasst Lichtfunktionen, welche die Verkehrssicherheit erhöhen, die sogenannten Lichtassistenz- und Lichtführungsfunktionen. Mit diesen sollen die im Kapitel 2.2 beschriebenen Defizite kompensiert werden, indem die Lichtfunktionen den Fahrer unterstützen [GUT14b]. Mögliche Lichtfunktionen sind das von Funk [FUN15] vorgestellte "Baustellenlicht", durch das die Defizite bei der Orientierung und Spurführung in den Nachtstunden kompensierbar sind. Ebenso könnte zukünftig ein erweitertes Kurvenlicht angeboten werden, bei dem spurgenaue die Fahrbahn ausgeleuchtet wird. Die Unterstützung des Fahrers in der Routenführung kann durch gezieltes Hervorheben einer Abzweigung,

beziehungsweise eines Verkehrsschildes, erfolgen [GUT14a]. Somit wären Orientierungsprobleme bei Nacht kompensierbar.

Der Schwerpunkt des zweiten Ansatzes liegt auf den Kommunikations- und Interaktionsfunktionen. Beispielsweise kann ein Beschleunigungs- und Abbremsvorgang anderen Verkehrsteilnehmern mitgeteilt werden. Bei zukünftigen Fahrzeugen wäre die Aktivierung des autonomen Fahrmodus oder darüber hinaus die Fahrzeugtrajektorie darstellbar. Licht bietet sich auch an, den Blickkontakt zwischen Fahrer und Passant zu ersetzen. Es könnten sogar mehrere Kommunikationspartner von dem Fahrzeug eindeutig adressiert werden, indem eine Linie, ausgehend vom Fahrzeug und endend am Passanten, auf die Fahrbahn projiziert wird.

Im dritten Ansatz könnte die Lichtverteilung und die Lichtfunktion des Ablend- und Fernlichts hinsichtlich Lichtstärke und Ausleuchtbereich so programmiert werden, dass diese den jeweiligen gesetzlichen Anforderungen und den unterschiedlichen Märkten gerecht wird. Heutzutage erfolgt diese Anpassung durch eine kostenintensive Anpassung der Werkzeuge. Schlussendlich könnte der Fahrer auch selbst diese Einstellung über die Auswahl von verschiedenen Optionen in einem Mensch-Maschine Interface (MMI) vornehmen und somit seine Lichtverteilung personalisieren.

Die vorgestellten Lichtfunktionen haben einen Funktionsumfang der sich mit einem HUD überschneiden kann. Im Folgenden wird deshalb diskutiert, welche Funktion in welcher Anzeigeneinheit

verortet werden soll. In der Tabelle 5.1 sind die Vorteile der jeweiligen Anzeigeeinheit dargestellt.

**Tabelle 5.1:** Darstellung der Vorteile der Scheinwerfer- und HUD-Technologie.

<b>Vorteil Scheinwerfer</b>	<b>Vorteil HUD</b>
Kommunikation mit der Außenwelt	Information nur für Fahrer sichtbar
Verbesserte Wahrnehmung von Objekten durch angepasste Ausleuchtung	Bildqualität unabhängig von Projektionsfläche
Sichtverbesserung	Unabhängig von Tageszeit, Wetter und Verkehrsdichte
	Gesetzliche Zulassung

Ein Vorteil von Scheinwerfern gegenüber einem HUD ist, dass die Sicht durch gezieltes Ausleuchten tatsächlich verbessert werden kann. Dadurch sind Objekte und Gefahrenstellen in der Außenwelt besser wahrnehmbar. Ein HUD bietet sich für Symbolprojektionen wie Geschwindigkeit oder Abbiegepfeile an, denn die Projektion ist konsequent umsetzbar - unabhängig von der Tageszeit, den Umweltbedingungen und der Verkehrsdichte. Außerdem sind sensible Informationen nur für den Fahrer und nicht für andere Verkehrsteilnehmer sichtbar.

Die Anforderungen an den Öffnungswinkel, um ein Symbol virtuell in die Umwelt zu platzieren, sind zwischen einem Scheinwerfer und

HUD nahezu identisch. Allerdings sind der Öffnungswinkel sowie die virtuelle Projektionsentfernung für augmented Funktionen im HUD durch die Länge des „virtuellen“ optischen Pfades und das Volumen der Projektionseinheit beschränkt.

### 5.2.2 ADAPTIVE FERNLICHTFUNKTIONEN

Hochaufgelöste Pixellichtsysteme ermöglichen es, das blendfreie Fernlicht zu optimieren. Es gibt drei Vorteile:

- a.) Erhöhung des Nutzungsgrads
- b.) Kontinuierliche Objektverschiebung
- c.) Ruhiges Schaltverhalten

Der erste Vorteil ist, dass der Nutzungsgrad des blendfreien Fernlichts durch eine höhere Auflösung vergrößert werden kann. Damit sind auch bei hohen Entfernungen in einem kleinen Winkelbereich Objekte entblendbar. Hummel zeigte in seiner Arbeit, dass bei einem Pixellicht, mit einer Auflösung  $0,1^\circ$  der Nutzungsgrad auf 98,14 % gesteigert werden kann [HUM10]. Der zweite Vorteil ist, dass der auszublendende Objektbereich in Abhängigkeit der Technologie ohne sichtbares Schalten von Segmenten, nahezu kontinuierlich verschiebbar ist. Der dritte Vorteil eines hochaufgelösten blendfreien Fernlichts ist, dass das Ausblenden von Objekten ruhiger erscheint. Durch die höhere

Auflösung müssen zwar mehr Pixel geschaltet werden, diese sind jedoch deutlich kleiner und dadurch weniger wahrnehmbar.

Neben den hier genannten Vorteilen, bei der Optimierung des blendfreien Fernlichts, können bei der Matrix-Scanner-Technologie zwei neue Lichtfunktionen umgesetzt werden, da der strahlgeführte Ansatz es ermöglicht Licht zu „verschieben“. Die erste Funktion ist ein geschwindigkeitsabhängiges Licht. Bei diesem Ansatz wird bei hohen Geschwindigkeiten die Amplitude des Mikrospiegels verkleinert. Dadurch steigt die Lichtstärke durch die höhere Aufenthaltszeit im zentralen Sichtfeld bei hohen Geschwindigkeiten an. Somit kann die Sichtweite vergrößert werden.

Die zweite Funktion macht sich zu Nutze, dass bei einem quasistatisch betriebenen System die Aufenthaltszeit modulierbar ist. Dadurch ist Licht von Bereichen mit kurzer Aufenthaltszeit in Bereiche mit längerer Aufenthaltszeit „verschiebbar“. Dies kann sowohl für ein Markierungslicht im Fernlicht wie auch für ein "Baustellenlicht" im Abblendlicht sinnvoll sein.

### 5.3 ÖFFNUNGSWINKEL

Im folgenden Kapitel sollen die benötigten Öffnungswinkel für eine Abblend- oder Fernlichtfunktion bestimmt werden. In Kapitel 4.3 wurde gezeigt, dass für einen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel von  $\alpha_d = 40^\circ$  und  $\beta_d = 20^\circ$  eine maximale optische Leistung von über 100 W und eine mittlere optische Leistung von

über 30 W notwendig ist. Da die benötigte optische Leistung neben der Lichtfunktion auch vom benötigten Öffnungswinkel abhängig ist, muss für jede beschriebene Lichtfunktion der Ausleuchtbereich bestimmt werden. Die Untersuchung erfolgt hierbei für das Fernlicht und für das Abblendlicht getrennt, da sich hierfür unterschiedliche Anforderungen ergeben. Für die adaptiven Abblendlichtfunktionen gilt, dass mindestens ein Scheinwerfer den Ausleuchtbereich abdeckt. Des Weiteren gelten die im Anhang B.1 und B.2 dargestellten Werte für die Standardstraße und das Standardfahrzeug, sowie die Abstands- und Winkelbezeichnungen.

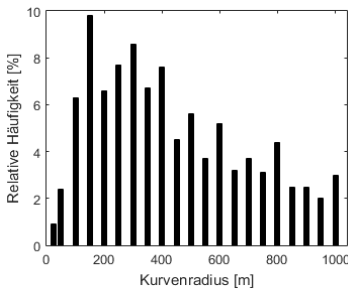
Alle beschriebenen adaptiven Abblendlichtfunktionen beschränken sich auf eine Projektion innerhalb der eigenen Fahrspur. Für die Berechnungen sind die in [GUT16a] und [GUT16c] definierten Werte für den Projektionsabstand  $l_{\text{PAB}}$  von 10 m und die Projektionslänge  $l_{\text{PRO}}$  von 15 m zu berücksichtigen. Der Projektionsabstand ist so gewählt, dass der Fahrzeuginsasse den Ausleuchtbereich einsehen kann. Zusätzlich kann der auf der Fahrbahn reflektierte Streulichtanteil reduziert werden [DAM95]. Die in diesem Kapitel ermittelten Öffnungswinkel sind auch für andere augmented Funktionen, beispielsweise eines HUD, verwendbar.

### 5.3.1 VERKEHRSRAUMANALYSE

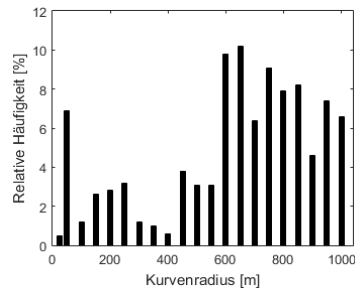
Die in den nächsten Kapiteln berechneten Öffnungswinkel sind für eine anschließende Diskussion in Bezug zu den prozentual



auftretenden Kurvenradien zu setzen. Dazu werden in diesem Kapitel die Daten von bereits durchgeführten Verkehrsraumuntersuchungen analysiert. Auf Basis der Daten aus der Dissertation von Schwab [SCH03a] und [KUH06] wurden die unten dargestellten Histogramme für die Kurvenhäufigkeit auf Landstraßen und Autobahnen in Deutschland erstellt.



**Abbildung 5.2:** Histogramm der Kurvenhäufigkeit auf Landstraßen nach Daten von Schwab [SCH03a].

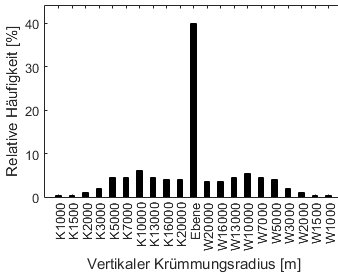


**Abbildung 5.3:** Histogramm der Kurvenhäufigkeit auf Autobahnen nach Daten von Schwab [SCH03a].

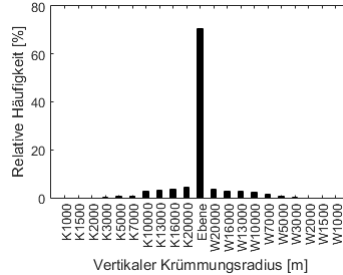
Auf Landstraßen und Autobahnen haben 90 % aller Kurven einen Kurvenradius größer als 100 m. Werden auf Autobahnen die Ausfahrten nicht mit gezählt, so erhöht sich diese Zahl auf über 95 % aller Kurvenradien.

Die Analyse von Verkehrsraumdaten von [KUH06] zeigte auch die relative Häufigkeit von Kuppen und Wannen auf deutschen Landstraßen und Autobahnen. So wird aus der Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 ersichtlich, dass die kleinsten Wannen- und

Kuppenradien 1000 m entsprechen. Wie zu erwarten, sind die Radien im Vergleich zu einer Landstraße deutlich kleiner.



**Abbildung 5.4:** Histogramm von der Kuppen und Wannenhäufigkeit auf Landstraßen nach Daten von Kuhl [KUH06].



**Abbildung 5.5:** Histogramm von der Kuppen und Wannenhäufigkeit auf Autobahnen nach Daten von Kuhl [KUH06].

### 5.3.2 AUSLEUCHTÜBERLAPPUNG

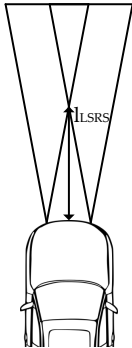
Es ist zu berücksichtigen, dass ein zu bestimmender Öffnungswinkel abhängig von der Ausrichtung des Matrix Scanner Moduls ist. In Anlehnung an die Arbeit von Schwab [SCH03a] wird die horizontale Ausrichtung auch als „Schwenkung“ und der Winkel als „Schwenkwinkel“ bezeichnet. Die Ausleuchtüberlappung ist, aufgrund der Projektionsentfernung von 25 m, insbesondere im Abblendlicht relevant. Im Folgenden werden drei unterschiedliche spiegelsymmetrische Schwenkungen der Matrix Scanner Module betrachtet, welche in der Tabelle 5.2 zu sehen sind. Die Schwenk-

winkel tragen hierbei die Bezeichnungen der im Anhang B.2 aufgeführten Nomenklaturen.

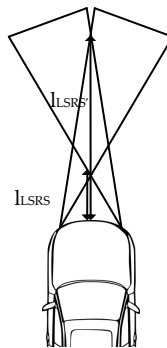
**Tabelle 5.2:** Schwenkwinkel von drei verschiedenen Betrachtungsfällen für den linken und rechten Scheinwerfer (HSW).

Schwenkrichtung	Linker HSW	Rechter HSW
Fall 1: Keine Schwenkung	$\gamma_{LS} = 0^\circ$	$\gamma_{RS} = 0^\circ$
Fall 2: Schwenkung nach innen	$\gamma_{LS} < 0^\circ$	$\gamma_{RS} > 0^\circ$
Fall 3: Schwenkung nach außen	$\gamma_{LS} > 0^\circ$	$\gamma_{RS} < 0^\circ$

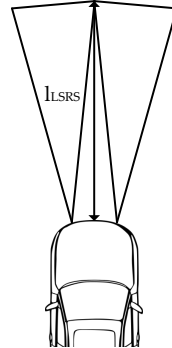
In den folgenden Abbildungen 5.6, 5.7 und 5.8 sind die drei verschiedenen Schwenkfälle dargestellt.



**Abbildung 5.6:** Fall 1, keine Schwenkung.



**Abbildung 5.7:** Fall 2, Schwenkung nach innen.



**Abbildung 5.8:** Fall 3, Schwenkung nach außen.

Aufgrund der Symmetrie ist der Betrag der Schwenkung für den linken und rechten Scheinwerfer immer gleich groß. Somit gilt, dass

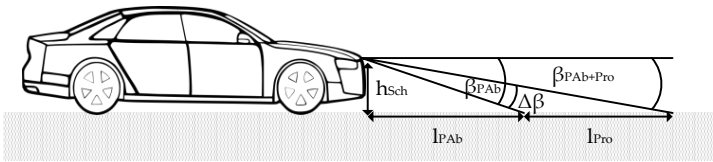
$|\gamma_{LS}| = |\gamma_{RS}| = \gamma$  ist. Die drei verschiedenen Schwenkansätze bringen unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich, welche in der Tabelle 5.3 zusammengefasst sind.

**Tabelle 5.3:** Auswirkung der Schwenkrichtung auf den Ausleuchtbereich, die Ausleuchtüberlappung und den Projektionsabstand.

Parameter	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Ausleuchtbereich	Keine Auswirkung.	Kleinerer Schwenkwinkel $\gamma$ im Vergleich zu Fall 3 notwendig, um den gleichen Kurvenradius abzudecken.	Größerer Schwenkwinkel $\gamma$ im Vergleich zu Fall 2 notwendig, um den gleichen Kurvenradius abzudecken.
Ausleuchtüberlappung	Dauerhaft.	Lichtverteilungen divergieren.	Dauerhaft.
Projektionsabstand	Kein Einfluss.	Projektionsabstand $l_{PAb}$ ist kleiner als bei Fall 3.	Projektionsabstand $l_{PAb}$ ist größer als bei Fall 2.

### 5.3.3 VERTIKALER ÖFFNUNGSWINKEL

Im folgenden Absatz werden die benötigten vertikalen Öffnungswinkel berechnet. Diese ergeben sich durch die Entfernung vom Auftrittspunkt zum Endpunkt der Abblendlichtfunktion sowie der Anbauhöhe. Der Projektionsabstand  $l_{PAb}$  gibt an, ab welcher Entfernung eine Lichtverteilung auf die Straße trifft. Die Projektionslänge  $l_{Pro}$  gibt die Länge einer Projektion an. Eine Projektion endet dementsprechend im Abstand  $l_{PAb} + l_{Pro}$ . Die korrespondierenden vertikalen Winkel sind gemäß der Abbildung 5.9, mit  $\beta_{PAb}$  und  $\beta_{PAb+Pro}$  bezeichnet.



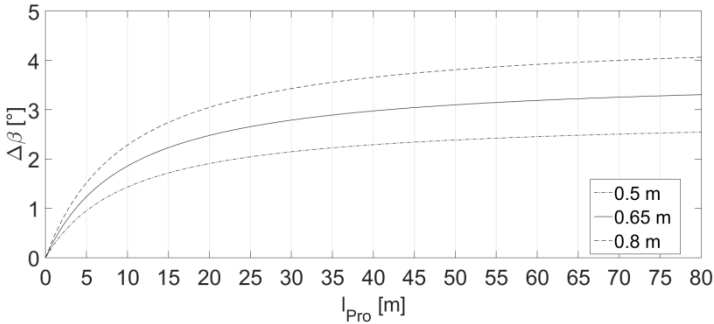
**Abbildung 5.9:** Darstellung des Projektionsabstands und der Projektionslänge, sowie der vertikalen Winkel.

Die von der Projektionslänge, dem Projektionsabstand und der Anbauhöhe abhängigen vertikalen Öffnungswinkel  $\Delta\beta$  ergeben sich aus der Gleichung (5.1) und (5.2):

$$\Delta\beta = |\beta_{PAb}| - |\beta_{PAb+Pro}| \quad (5.1)$$

$$\Delta\beta = \left| -\arctan\left(\frac{h_{Sch}}{l_{PAb}}\right) \right| - \left| -\arctan\left(\frac{h_{Sch}}{l_{PAb} + l_{Pro}}\right) \right| \quad (5.2)$$

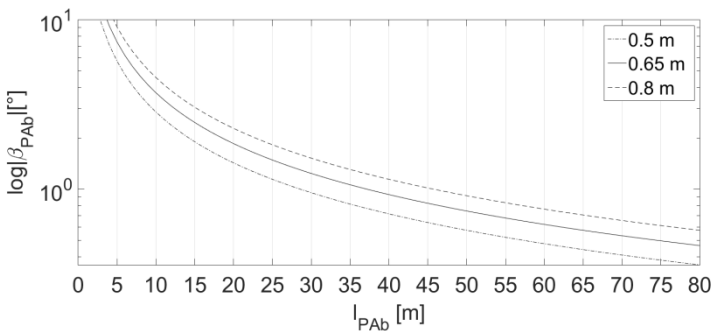
Für den im Kapitel 5.3 auf Seite 87 definierten Projektionsabstand  $l_{\text{PAb}}$  von 10 m kann  $\Delta\beta$  für verschiedene Anbauhöhen und Projektionslängen  $l_{\text{Pro}}$  bestimmt werden. Dies ist in Abbildung 5.10 dargestellt.



**Abbildung 5.10:** Abhängigkeit des vertikalen Öffnungswinkel  $\Delta\beta$  von der Projektionslänge  $l_{\text{Pro}}$  und von drei verschiedenen Anbauhöhen des Scheinwerfers  $h_{\text{Sch}}$  bei einem konstanten Projektionsabstand  $l_{\text{PAb}}$  von 10 m.

In einer zweiten Darstellung ist der Betrag des benötigten Austrittswinkels  $\beta_{\text{PAb}}$  in Abhängigkeit des Projektionsabstandes  $l_{\text{PAb}}$  für verschiedene Anbauhöhen zu sehen. Es ist offensichtlich, dass für Projektionsabstände nahe vor dem Fahrzeug ein größerer vertikaler Öffnungswinkel benötigt wird. Deshalb muss analysiert werden welcher vertikale Öffnungswinkel mindestens notwendig ist. Eine Einschränkung ist beispielsweise die Sichtbarkeit der Lichtfunktionen in Abhängigkeit der Kopf- und Sitzposition des Fahrers, was

eine Darstellung der Lichtfunktion im Bereich von wenigen Metern vor dem Fahrzeug als nicht sinnvoll erscheinen lässt. Für Kommunikationsfunktionen mit Passanten könnten solche Projektionsabstände jedoch durchaus nützlich sein. Aus der Abbildung 5.11 wird ersichtlich, welcher vertikale Öffnungswinkel in Abhängigkeit des Projektionsabstands auf einer ebenen Fahrbahn notwendig ist.

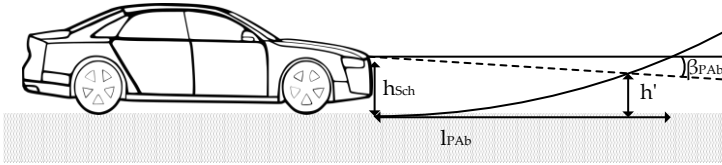


**Abbildung 5.11:** Betrag des Winkels  $\beta_{PAb}$  in Abhängigkeit des Projektionsabstands  $l_{PAb}$  für drei verschiedene Anbauhöhen  $h_{Sch}$  des Scheinwerfers.

Bei Kuppen- und Wannenfahrten ändert sich dieser vertikale Winkel. Der vertikale Winkel berechnet sich gemäß folgender Gleichungen:

$$\beta_{PAb} = \arctan \frac{h_{Sch} - h'}{l_{PAb}} \quad (5.3)$$

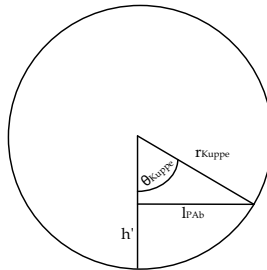
Die Anbauhöhe des Scheinwerfers ist hierbei mit  $h_{\text{Sch}}$  und die Höhe bedingt durch die Kuppe mit  $h'$  gekennzeichnet. Die Parameter sind in Abbildung 5.12 dargestellt.



**Abbildung 5.12:** Darstellung des vertikalen Winkels  $\beta_{\text{PAAb}}$  in Abhängigkeit des Projektionsabstands  $l_{\text{PAAb}}$  und der Kuppenhöhe  $h'$  in Kuppenfahrten.

Die Höhe  $h'$  kann aus der Gleichung (5.4) bestimmt werden, wobei die Parameter der Abbildung 5.13 zu entnehmen sind.

$$h' = r_{\text{Kuppe}}(1 - \cos \theta_{\text{Kuppe}}) \quad (5.4)$$



**Abbildung 5.13:** Exemplarische Darstellung einer Kuppe sowie der Parameter, welche zu Berechnung der Kuppenhöhe  $h'$  notwendig sind.



Der Winkel  $\theta_{Kuppe}$  ist gemäß Gleichung (5.10) definiert zu:

$$\theta_{Kuppe} = \arcsin \frac{l_{PAb}}{r_{Kuppe}} \quad (5.5)$$

Wird die Gleichung (5.5) in (5.4) eingesetzt so ergibt sich die Formel (5.6):

$$h' = r_{Kuppe} \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{l_{PAb}}{r_{Kuppe}}\right)\right) \quad (5.6)$$

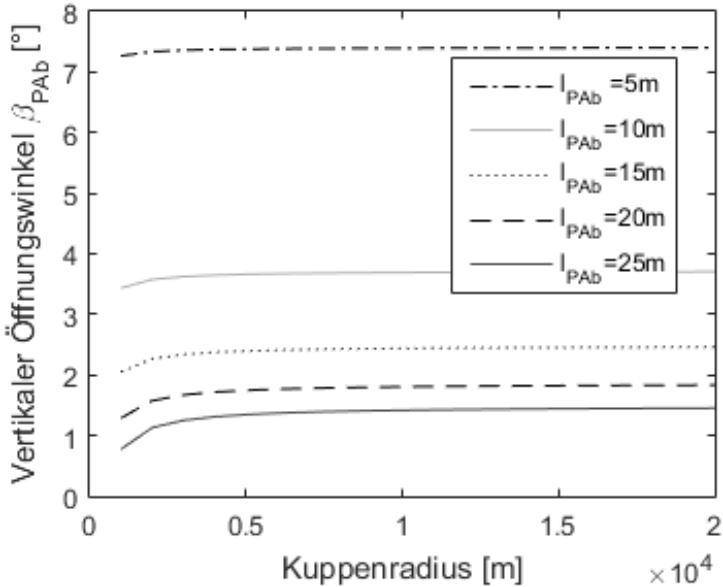
Durch einsetzen der Gleichung (5.6) in (5.3) kann der vertikale Winkel beim Durchfahren einer Kuppe ermittelt werden:

$$\beta_{PAb} = \arctan \frac{h_{Sch} - r_{Kuppe} \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{l_{PAb}}{r_{Kuppe}}\right)\right)}{l_{PAb}} \quad (5.7)$$

Der Fehler, welcher dadurch entsteht, dass der Projektionsabstand  $l_{PAb}$  nicht entlang der Kuppe verläuft beträgt beim kritischen Wannen- und Kuppenradius von 1.000 m weniger als 1 %. Der vertikale Winkel für Wannen ist berechenbar, indem der negative Wert von  $h'$  verwendet wird.

Im Folgenden werden die vertikalen Winkel für Kuppen- und Wannenfahrten berechnet. Dabei sind, in Abhängigkeit von der Kuppen- oder Wannenfahrt sowie dem Start- und Ende der Projektion unterschiedliche Winkel vorzuhalten. Bei einer Kuppenfahrt ist beispielsweise das Ende der Lichtfunktion von Relevanz. Endet eine Lichtfunktion beispielsweise im Abstand  $l_{PAb}$  von 25 m, so ist gemäß Gleichung (5.12) ein Winkel von  $0,68^\circ$  nach oben vorzuhalten. Diese Winkel sind der Tabelle 5.4 entnehmbar. In

der Abbildung 5.14 sind die vertikalen Winkel für alle in der Verkehrsraumanalyse aufgelisteten Kuppenradien dargestellt.

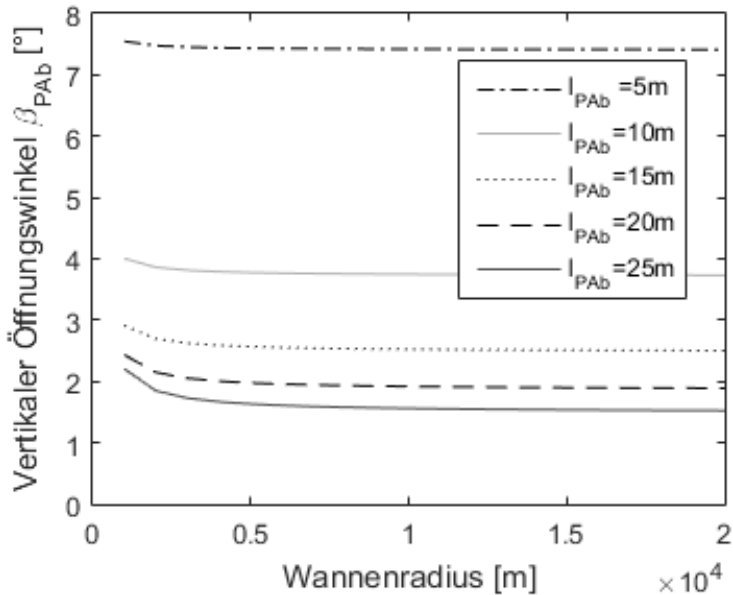


**Abbildung 5.14:** Darstellung der Verschiebung des vertikalen Winkels in Abhängigkeit des Kuppenradius bei einer Anbauhöhe von  $h_{sch} = 0,65$  m.

**Tabelle 5.4:** Änderung des vertikalen Winkels bei einer Scheinwerferanbauhöhe  $h_{sch}$  von 0,65 m zwischen einem Kuppenradius von  $r_{Kuppe} = 20.000$  m und  $r_{Kuppe} = 1.000$  m.

Abstand $l_{PAAb}$	$r_{Kuppe} = 20.000$ m	$r_{Kuppe} = 1.000$ m	$\Delta\beta$
10 m	3,70°	3,43°	0,27°
25 m	1,45°	0,77°	0,68°

Bei Wannenfahrten, bei dem der Start der Lichtfunktion entscheidend ist, ist bei einem Projektionsabstand  $l_{\text{PAB}}$  von 10 m ein Winkel von  $0,27^\circ$  nach unten einzuplanen. Diese Winkel sind aus der Tabelle 5.5 und der Abbildung 6.6 ablesbar.



**Abbildung 5.15:** Darstellung der Verschiebung des vertikalen Winkels in Abhängigkeit des Wannenradius bei einer Anbauhöhe von  $h_{\text{Sch}} = 0,65$  m.

**Tabelle 5.5:** Änderung des vertikalen Winkels bei einer Scheinwerferanbauhöhe  $h_{Sch}$  von 0,65 m zwischen einem Wannenradius von  $r_{Wanne} = 20.000$  m und  $r_{Wanne} = 1.000$  m.

Abstand $l_{PAb}$	$r_{Wanne} = 20.000$ m	$r_{Wanne} = 1.000$ m	$\Delta\beta$
10 m	3,73°	4,00°	-0,27°
25 m	1,52°	2,20°	-0,68°

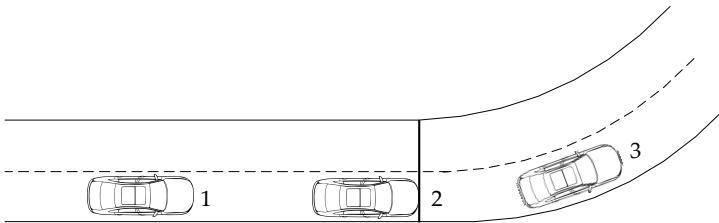
### 5.3.4 HORIZONTALER ÖFFNUNGSWINKEL

Im Folgenden soll der horizontale Öffnungswinkel für die adaptiven Fernlicht- und Abblendlichtfunktionen bestimmt werden. Bei allen Berechnungen können Messfehler aufgrund der Vernachlässigung der Anbauhöhe auftreten, welche jedoch kleiner als 1 % sind.

#### 5.3.4.1 ABBLENDLICHTBEREICH

Wie oben erwähnt soll der benötigte Öffnungswinkel, für Projektionen auf die eigene Fahrspur bei einem Projektionsabstand  $l_{PAb}$  von 10 m und einer Projektionslänge von  $l_{Pro}$  von 15 m, ermittelt werden. Dazu ist zunächst der kritischste Fall zu bestimmen. Es ist offensichtlich, dass eine Kurvenausleuchtung größere Anforderungen an den Öffnungswinkel stellt, als die Ausleuchtung einer Geraden. Zusätzlich ist beim Befahren einer rechten Fahrspur eine Linkskurve, hinsichtlich der benötigten Winkel, kritischer zu bewerten als eine Rechtskurve.

Es gibt drei mögliche Positionen, dargestellt in Abbildung 5.16, auf deren Basis die Berechnung eines horizontalen Öffnungswinkels beim Befahren einer Kurve durchgeführt werden können. In der ersten Position befindet sich die Trajektorie des Fahrzeugs auf einer Geraden. Der Abstand zu der auszuleuchtenden Kurve ist größer und dies resultiert in einem kleineren Öffnungswinkel. In der zweiten Position ist das Fahrzeug noch nicht am Gieren, jedoch ist der Abstand zur Kurve geringer, womit der benötigte Öffnungswinkel größer ist. In der dritten Position befindet sich das Fahrzeug bereits im Gieren und der benötigte Öffnungswinkel ist aufgrund der Drehung des Fahrzeugs kleiner als in der zweiten Position.



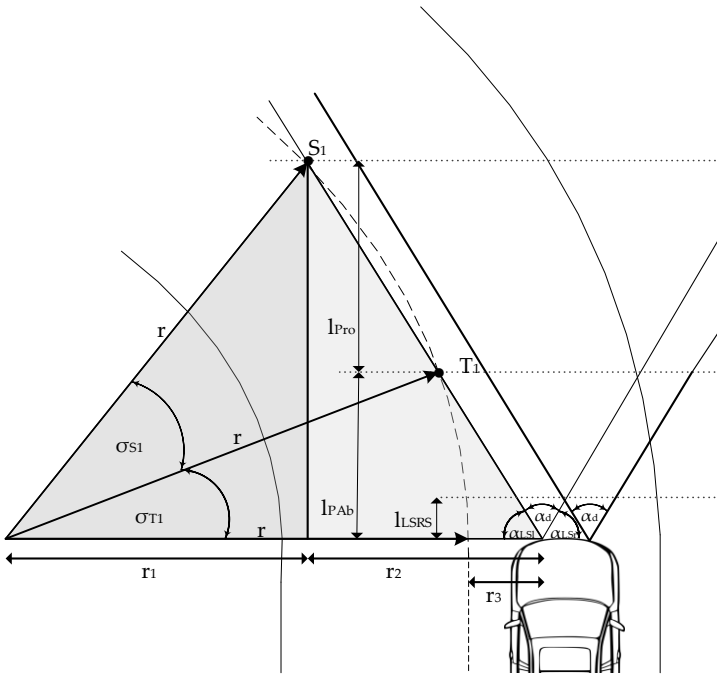
**Abbildung 5.16:** Darstellung von drei verschiedenen Positionen eines Fahrzeugs beim Durchfahren einer Linkskurve.

Auf Basis der zweiten Position sind im nächsten Abschnitt die Abhängigkeiten des Öffnungs- und Schwenkwinkels vom Radius der Mittelspurmarkierung zu bestimmen. Die Bestimmung basiert auf der oben beschriebenen Tabelle der drei verschiedenen Schwenkfälle. In dieser Betrachtung gilt, dass die Öffnungswinkel

des linken Scheinwerfers gleich groß zu wählen sind wie die Öffnungswinkel des rechten Scheinwerfers. Somit gilt, gemäß Anhang B.2, dass  $\alpha_{LSd} = \alpha_{RSd} = \alpha_d$  ist.

**Fall 1: Keine Schwenkung:  $\gamma_{LS} = \gamma_{RS} = 0^\circ$**

In der folgenden Abbildung sind die für die Berechnung benötigten Winkelbezeichnungen und Abstände zu sehen.



**Abbildung 5.17:** Darstellung der Winkel und Abstände für den Fall 1, Matrix Scanner Modul nicht geschwenkt.

Es muss gelten, dass die Überlappungsentfernung  $l_{LSRS}$  größer als der Projektionsabstand  $l_{Pro}$  ist, damit keine Lücken in der Lichtverteilung auftreten.

$$l_{LSRS} \geq P_{PAb} \quad (5.8)$$

Daraus lässt sich eine erste Bedingung für den Öffnungswinkel  $\alpha_d$  ableiten.

$$\alpha_d \geq 2 \arctan \left( \frac{\frac{b_{Kfz}}{2} - d_{Sch}}{l_{LSRS}} \right) \geq 2 \arctan \left( \frac{0,6m}{10m} \right) \geq 6,8^\circ \quad (5.9)$$

Die Werte gelten für ein Standardfahrzeug sowie eine Standardstraße und können dem Anhang B.1 entnommen werden. Für die zweite Bedingung muss gelten, dass der Kurvenpunkt  $S_1$  von der Lichtverteilung ausgeleuchtet wird. Mit dieser Bedingung können die unten folgenden trigonometrischen Gleichungen aufgestellt werden.

$$r = r_1 + r_2 - r_3 \quad (5.10)$$

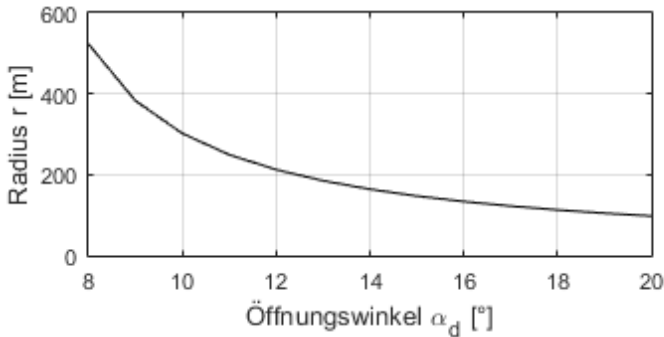
$$r = r \cdot \cos(\sigma_{s1} + \sigma_{T1}) + \frac{(l_{Pro} + l_{PAb})}{\tan\left(90 - \frac{\alpha_d}{2}\right)} - (d_{Str} + d_{Sch}) \quad (5.11)$$

$$\sigma_{s1} + \sigma_{T1} = \sin^{-1} \left( \frac{l_{Pro} + l_{PAb}}{r} \right) \quad (5.12)$$

Wird die Gleichung (5.12) in Gleichung (5.11) eingesetzt, so ergibt sich folgender Term:

$$0 = r \cdot \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{l_{Pro} + l_{PAb}}{r}\right)\right) + \frac{(l_{Pro} + l_{PAb})}{\tan\left(90 - \frac{\alpha_d}{2}\right)} - d_{Str} - d_{Sch} - r \quad (5.13)$$

Diese implizite Gleichung kann numerisch gelöst werden. Die Lösungen, die sich hieraus ergeben, sind in Abbildung 5.18 dargestellt.



**Abbildung 5.18:** Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\alpha_d$ , der benötigt wird um die eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m auszuleuchten, in Abhängigkeit des Kurvenradius  $r$ .

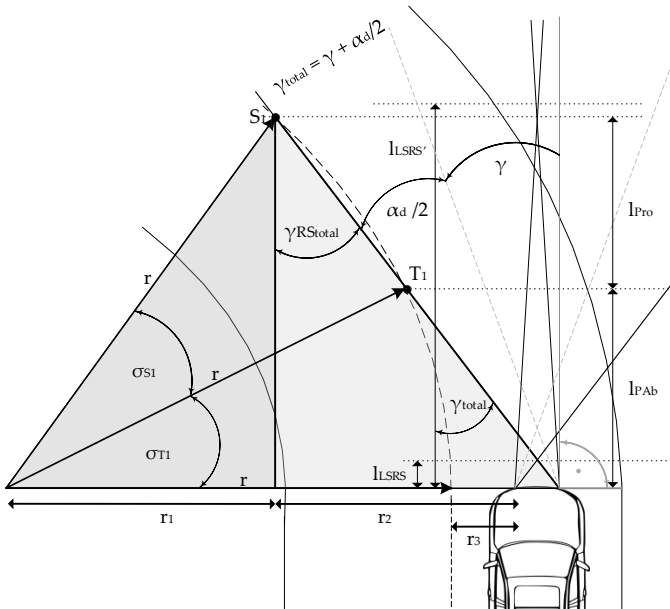
Dies bedeutet, dass um die komplette eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m für Kurvenradien bis 200 m ausleuchten zu können, ein Öffnungswinkel von mindestens  $12^\circ$  notwendig ist.

**Fall 2: Schwenkung nach innen  $\gamma_{RS} > 0^\circ$ ,  $\gamma_{LS} < 0^\circ$**

Für diesen Fall wird der rechte Scheinwerfer betrachtet, da dieser aufgrund der Schwenkung nach innen den linken Bereich der



Fahrspur ausleuchtet. In folgender Abbildung ist die Schwenkung nach innen dargestellt.



**Abbildung 5.19:** Darstellung der Winkel und Abstände für den Fall 2, Matrix Scanner Module nach innen zur Fahrzeuglängsachse geschwenkt.

Es muss gelten, dass die Entfernung bei „Nichtüberlappung“  $l_{LSRS}'$  größer ist als die Summe aus Projektionsabstand und der Projektionslänge. Dies resultiert in Gleichung (5.14).

$$l_{LSRS'} \geq l_{PAb} + l_{Pro} \geq 25 \text{ m} \quad (5.14)$$

Unter Berücksichtigung der Winkel ergibt sich die Ungleichung (5.15).

$$\frac{\alpha_d}{2} + \tan^{-1} \left( \frac{b_{Kfz} - 2 \cdot d_{Sch}}{2 \cdot l_{LSRS'}} \right) \geq \gamma_{RS} \quad (5.15)$$

Werden die Werte für ein Standardfahrzeug und eine Standardstraße eingesetzt so muss für  $\alpha_d$  gelten:

$$\alpha_d \geq 2 \cdot (\gamma_{RS} - 1,37^\circ) \quad (5.16)$$

Mit den folgenden Gleichungen ist der Radius  $r$  berechenbar. Die zwei Dreiecke sind die gleichen, jedoch muss der Schwenkwinkel mit berücksichtigt werden. Die Gleichungen sind wie folgt:

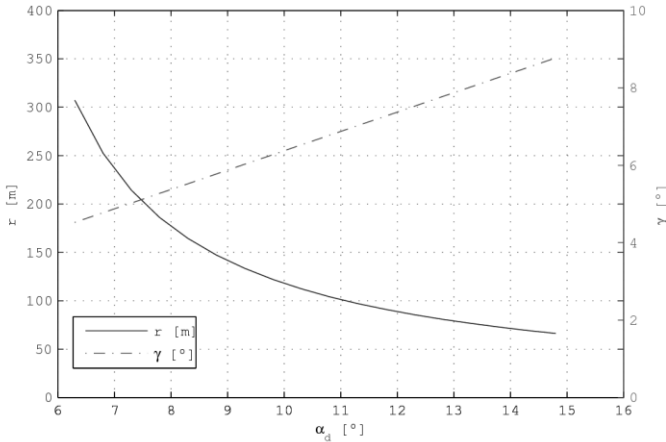
$$r = r_1 + r_2 - r_3 \quad (5.17)$$

$$r = r \cdot \cos(\sigma_{s1} + \sigma_{T1}) + \frac{(l_{Pro} + l_{PAb})}{\tan\left(90 - (\gamma_{RS} + \frac{\alpha_d}{2})\right)} - (d_{str} + b_{kFz} - d_{Sch}) \quad (5.18)$$

$$\sigma_{s1} + \sigma_{T1} = \sin^{-1} \left( \frac{l_{Pro} + l_{PAb}}{r} \right) \quad (5.19)$$

$$r = r \cdot \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{l_{Pro} + l_{PAb}}{r} \right) \right) + \frac{(l_{Pro} + l_{PAb})}{\tan\left(90 - (\gamma_{RS} + \frac{\alpha_d}{2})\right)} - (d_{str} + b_{kFz} - d_{Sch}) \quad (5.20)$$

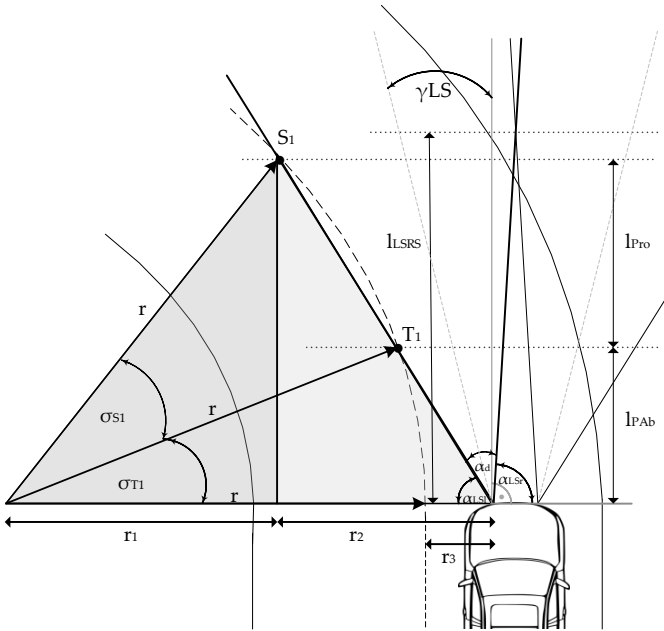
Die Lösungen werden, wie im Fall 1, numerisch bestimmt. Die Ergebnisse sind der Abbildung 5.20 zu entnehmen.



**Abbildung 5.20:** Öffnungswinkel, der benötigt wird um die eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m auszuleuchten, in Abhängigkeit des Kurvenradius  $r$ .

### 3. Fall: Schwenkung nach außen: $\gamma_{RS} < 0^\circ$ ; $\gamma_{LS} > 0^\circ$

In diesem Fall sind beide Matrix Scanner Module nach außen geschwenkt. In der folgenden Abbildung ist die Schwenkung zu sehen:



**Abbildung 5.21:** Darstellung der Winkel und Abstände für den Fall 3, Matrix Scanner Module nach außen geschwenkt.

Hierbei sind die Randbedingungen zu berücksichtigen:  $l_{LSRS} \geq l_{PAb}$ . Dies führt zu folgender Gleichung:

$$\frac{\alpha_d}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{b_{Kfz} - 2 \cdot d_{sch}}{2 \cdot l_{LSRS}} \right) \geq \gamma_{LS}$$

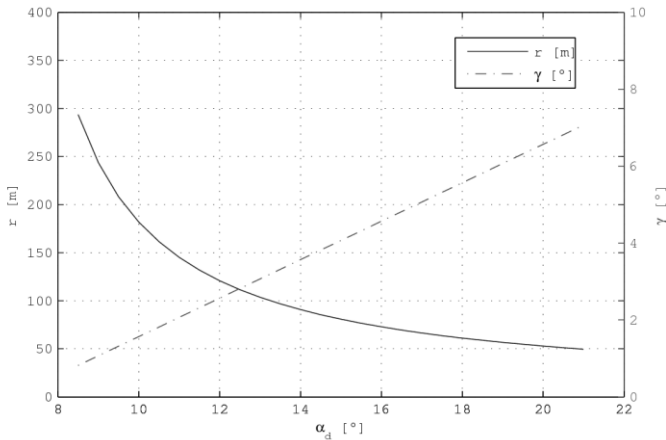
Die zur Berechnung notwendigen trigonometrischen Gleichungen sind wie folgt:

$$r = r_1 + r_2 - r_3 \quad (5.21)$$

$$r = r \cdot \cos(\sigma_{s1} + \sigma_{T1}) + \frac{(l_{Pro} + l_{PAb})}{\tan\left(90 - \gamma_{LS} - \frac{\alpha_d}{2}\right)} - (d_{Str} + d_{Sch}) \quad (5.22)$$

$$\sigma_{s1} + \sigma_{T1} = \sin^{-1}\left(\frac{l_{Pro} + l_{PAb}}{r}\right) \quad (5.23)$$

In der Abbildung 5.22 sind die Lösungen zu sehen. Es zeigt sich, dass durch die Randbedingung  $l_{LSRS} \geq l_{PAb}$ , der Öffnungswinkel  $\alpha_d$  im Vergleich zum zweiten Fall nicht verkleinert werden kann.

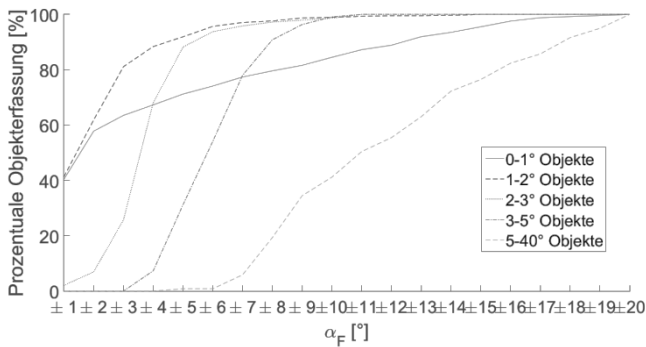


**Abbildung 5.22:** Öffnungswinkel  $\alpha_d$ , der benötigt wird um die eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m auszu-leuchten, in Abhängigkeit des Kurvenradius  $r$ .

### 5.3.4.2 FERNLICHTBEREICH

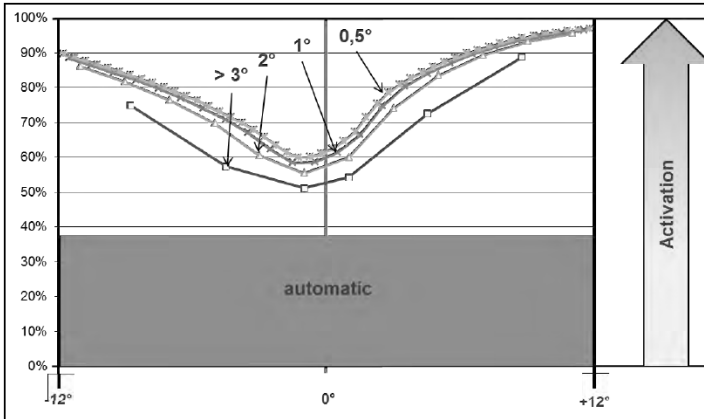
Im Folgenden soll der benötigte Öffnungswinkel für das Fernlicht berechnet werden. Im Fernlicht gelten andere Anforderungen an das Matrix Scanner Modul. Hierbei soll primär eine hohe Lichtstärke erzielt werden, um die Sichtweite zu optimieren. Die Überlagerung vom linken und rechten Matrix Scanner Modul erfolgt hierbei im Fernfeld, wodurch die Matrix Scanner Module nicht geschwenkt werden, was dazu führt, dass  $\gamma_{RS} = \gamma_{LS} = 0^\circ$  ist.

Um den benötigten Öffnungswinkel im Fernlichtbereich des Matrix Scanner Moduls festzulegen, wurde analysiert wo eine hochgenaue Ausblendung notwendig ist. Dazu sind die von Totzauer [TOT08] im Rahmen einer Verkehrsraumanalyse erhobenen Objekthäufigkeiten beim Befahren einer einspurigen Landstraße aus einer Kameraperspektive aufgearbeitet und in Abbildung 5.23 dargestellt worden. Der durch die Parallaxe entstehende Fehler wird in dieser Betrachtung vernachlässigt.



**Abbildung 5.23:** Darstellung der prozentualen Erfassung von auszublendenden Objekten in Abhängigkeit des Öffnungswinkels nach Totzauer [TOT08].

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass bereits mit sehr kleinen Öffnungswinkeln eine große Anzahl an hochauflösenden Objekten mit 0-1° Breite erfasst wird. Bei  $\pm 2^\circ$  sind es über 57 %, bei  $\pm 6^\circ$  sind bereits 74 % und bei  $\alpha_d = \pm 14^\circ$  sind sogar mehr als 94 % aller 0-1° breiten Objekte abgedeckt. Eine weitere Klassifizierung der Objekte zwischen  $0^\circ$  und  $1^\circ$  wurde durch Totzauer nicht durchgeführt. Es ist allerdings naheliegend, dass sich Objekte mit  $0,1^\circ$  in den mittleren Bereich verschieben.



**Abbildung 5.24:** Aktivierungsrate eines blendfreien Fernlichts in Abhängigkeit der Segmentgröße und des Ausleuchtbereichs [AUS14].

In einer Studie von Austerschulte [AUS14] wurde die Abhängigkeit der Aktivierungsrate von der Segmentbreite untersucht. Aus der Abbildung 5.24 wird ersichtlich, dass ein 2° großer Block außerhalb von  $\pm 6^\circ$  bereits zu 90 % der Zeit aktiviert ist. Im zentralen Bereich liegt dieser Wert nur bei rund 60 %. Jedoch zeigte eine Verfeinerung der Auflösung bis 0,5° im Bereich kleiner  $\pm 6^\circ$  nur eine geringe Auswirkung. So liegt zwischen 0,5° und 2° Segmenten ein Unterschied in der Aktivierungsrate von weniger als 5 %.



### 5.3.5 DISKUSSION UND ERGEBNISSE

Auf Basis der in Kapitel 5.3.4.1 aufgestellten Gleichungen, kann die Tabelle 5.6 erstellt werden. Dort sind, in Abhängigkeit des horizontalen Öffnungswinkels und unter Berücksichtigung der Randbedingungen, die resultierenden ausleuchtbaren Kurvenradien und Schwenkwinkel dargestellt.

**Tabelle 5.6:** Übersicht über die Radien von ausleuchtbaren Kurven in Abhängigkeit der Öffnungs- und Schwenkwinkel für den Fall 1 „keine Schwenkung“, für den Fall 2 „Schwenkung nach innen“ und den Fall 3 „Schwenkung nach außen“.

	$\alpha_d = 8^\circ$	$\alpha_d = 12^\circ$	$\alpha_d = 16^\circ$	$\alpha_d = 20^\circ$
Fall 1	$r = 523 \text{ m}$ $\gamma = 0^\circ$	$r = 212 \text{ m}$ $\gamma = 0^\circ$	$r = 133 \text{ m}$ $\gamma = 0^\circ$	$r = 98 \text{ m}$ $\gamma = 0^\circ$
Fall 2	$r = 177 \text{ m}$ $\gamma = 5.4^\circ$	$R = 89 \text{ m}$ $\gamma = 7.4^\circ$	$R = 60 \text{ m}$ $\gamma = 9.4^\circ$	$R = 46 \text{ m}$ $\gamma = 11.4^\circ$
Fall 3	$R = 370 \text{ m}$ $\gamma = 0.57^\circ$	$R = 121 \text{ m}$ $\gamma = 2.6^\circ$	$R = 71 \text{ m}$ $\gamma = 4.6^\circ$	$R = 53 \text{ m}$ $\gamma = 6.6^\circ$

In nachfolgender Tabelle werden für einen bestimmten Radius die benötigten Öffnungs- und Schwenkwinkel dargestellt.

**Tabelle 5.7:** Übersicht über die zur Ausleuchtung von Kurven benötigter Öffnungs- und Schwenkwinkel bei definierten Kurvenradien für den Fall 1 „keine Schwenkung“, für den Fall 2 „Schwenkung nach innen“ und den Fall 3 „Schwenkung nach außen“.

	<b>r = 100 m</b>	<b>r = 150 m</b>	<b>r = 200 m</b>	<b>r = 250 m</b>
Fall 1	$\alpha_d = 19.6^\circ$ $\gamma = 0^\circ$	$\alpha_d = 14.8^\circ$ $\gamma = 0^\circ$	$\alpha_d = 12.5^\circ$ $\gamma = 0^\circ$	$\alpha_d = 11^\circ$ $\gamma = 0^\circ$
Fall 2	$\alpha_d = 11^\circ$ $\gamma = 6^\circ$	$\alpha_d = 8.7^\circ$ $\gamma = 7.02^\circ$	$\alpha_d = 7.5^\circ$ $\gamma = 8.1^\circ$	$\alpha_d = 6.8^\circ$ $\gamma = 9^\circ$
Fall 3	$\alpha_d = 13.2^\circ$ $\gamma = 1^\circ$	$\alpha_d = 11^\circ$ $\gamma = 1.6^\circ$	$\alpha_d = 9.6^\circ$ $\gamma = 2.1^\circ$	$\alpha_d = 8.9^\circ$ $\gamma = 2.6^\circ$

Es ist offensichtlich, dass mit  $\alpha_d$  von  $11^\circ$  bis  $13,2^\circ$  bereits ein Kurvenradius von 100 m abgedeckt werden kann, sofern korrekt geschwenkt wird. Wie aus Kapitel 5.3.1 ersichtlich wird, haben über 90 % aller Kurven auf Landstraßen und Autobahnen einen Kurvenradius der größer als 100 m ist.

Der vertikale Öffnungswinkel beträgt, bei dem gewählten Projektionsabstand  $l_{\text{PAB}}$  von 10 m und einer Anbauhöhe von 0,65 m,  $3,71^\circ$  nach unten.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich die Projektion immer auf einer ebenen Fläche vor dem Fahrzeug befindet. Die Topografie und Nickbewegungen des Fahrzeugs wurden nicht berücksichtigt. Wenn diese mit einbezogen werden, könnte dies als Puffer im vertikalen Öffnungswinkel mit berücksichtigt werden.

Huhn [HUH99] ermittelte dafür in seiner Arbeit einen maximalen Nickwinkel von  $+1,49^\circ$  beim Beschleunigen und  $-1,81^\circ$  beim Bremsen auf einem Messgelände. Im realen Straßenverkehr war der Nickwinkel kleiner.

**Tabelle 5.8:** Nickwinkel beim Beschleunigen und Bremsen eines Fahrzeugs nach Huhn [HUH99].

	<b>Maximale Nickwinkel <math>\beta_{\max}</math> /° bei Beschleunigung</b>	<b>Maximale Nickwinkel <math>\beta_{\max}</math> /° bei Bremsung</b>
Innerorts	+1,20	-0,56
Landstraße	+1,23	-0,56
Autobahn	+1,09	-0,63

Damit die Projektionsentfernung eingehalten wird, müssten diese Winkel hinzu addiert werden. Wie Huhn zeigt, sind die Nickwinkel fahrzeugabhängig. Deshalb ist der tatsächlich zusätzlich benötigte vertikale Öffnungswinkel zunächst nicht bekannt. Dieser muss individuell hinzu addiert werden. Wird aber die Topografie und Schwenkung mit berücksichtigt, zeigt sich, dass ein deutlich größerer vertikaler Winkel benötigt wird. Eine mögliche Lösung ist die Implementierung einer LWR mit einer schnellen Reaktionszeit. Hierbei muss jedoch gewährleistet sein, dass die Achse der LWR in einem rechten Winkel zur Fahrzeugnormalen steht, da ansonsten die horizontale Ausleuchtung abhängig von der vertikalen Verkipfung ist.

## 5.4 AUFLÖSUNG

Die Auflösungsparameter beeinflussen die Effizienz aufgrund des Etendue-Gesetzes wie aus Kapitel 2.1 ersichtlich ist. Deshalb wird im Folgenden die benötigte Auflösung ermittelt. Details hinsichtlich der verschiedenen Auflösungsarten eines Matrix Scanner Systems kann der Ausarbeitung aus dem Jahr 2015 entnommen werden [GUT15].

### 5.4.1 ADAPTIVE ABBLENDLICHTFUNKTIONEN

Im Abblendlichtbereich gibt es drei Auflösungsanforderungen. Die Einblendauflösung  $\alpha_E$  und  $\beta_E$  beschreibt die horizontale und vertikale Größe eines Pixels in Grad. Sie ist wichtig, um zu beurteilen mit welcher Qualität eine Animationsfunktion dargestellt werden kann. Diese Auflösung sollte der des menschlichen Auges  $\psi_{\text{Auge}}$  von  $1/60^\circ$  entsprechen [WÖR07] damit keine einzelnen Pixel zu erkennen sind.

Die Verschiebeauflösung beschreibt die Auflösung mit dem ein Pixel verschoben werden kann. Die Verschiebeauflösung, gemessen in Grad, ist kleiner als die Einblendauflösung. Zur Wahrnehmung der Verschiebeauflösung sei auf die Arbeit von Jahn verwiesen [JAH16].

Zuletzt ist zu untersuchen, welche Auflösung für die Interaktion mit Passanten notwendig ist. Es muss berücksichtigt werden, dass bei

einer Anbauhöhe von 0,65 m ein Lichtstrahl von 0,1° Breite in 35 m Entfernung bereits 3,42 m auf der Straße entspricht. Soll in 35 m Entfernung ein 3 m breiter Fußgängerüberweg aus 5 Pixeln erzeugt werden, so ist beispielsweise eine Auflösung von mindestens 0,02° notwendig [GUT15].

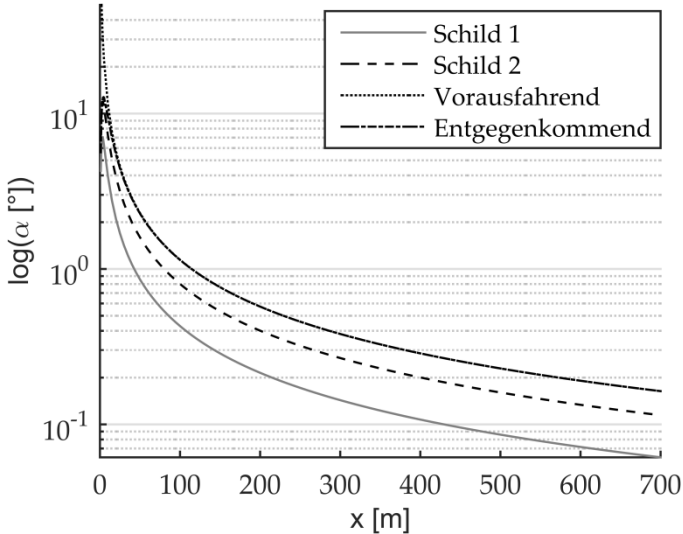
### 5.4.2 ADAPTIVE FERNLICHTFUNKTIONEN

Es ist offensichtlich dass eine größere Entfernung zu einem auszublenden Objekt in einer höheren Auflösung resultiert. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 5.1 beschriebenen Blendenschwellwerts von 350 cd beziehungsweise 0,56 lx in 25 m und der gesetzlich maximal zulässigen Lichtstärke von 215.000 cd kann eine Entfernung berechnet werden, ab der die Blendenschwelle unterschritten wird und eine Entblendung nicht mehr notwendig ist. Diese Entfernung ergibt sich aus Gleichung (5.24):

$$x_{max} = \sqrt{\frac{215.000 \text{ cd}}{0,56 \text{ lx}}} = 620 \text{ m} \quad (5.24)$$

Im Folgenden wird für vier unterschiedliche Objekte die benötigte Einblendauflösung bestimmt. Die durchgeführten Berechnungen basieren hierbei auf den Parametern einer Standardstraße und einem Standardfahrzeug. Das Geschwindigkeitszeichen, welches eines der untersuchenden Objekte ist, ist von seinem Mittelpunkt 1,5 m zur Straße entfernt und hat, laut der StVO, einen Durchmesser

von 75 cm [BUN10]. Die benötigte horizontale Auflösung für einen rechten Scheinwerfer kann der Abbildung 5.25 entnommen werden.



**Abbildung 5.25:** Ausblendauflösung eines rechten Scheinwerfers für entgegenkommende und vorrausfahrende Fahrzeuge sowie von zwei Verkehrsschildern, dargestellt in Abhängigkeit der Entfernung zum auszublendenden Objekt.

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass in einer Entfernung von 620 m eine Auflösung von  $0,1^\circ$  ausreichend ist, um andere Fahrzeuge zu entblenden. Dass höhere Auflösungen für ein blendfreies Fernlicht nicht notwendig sind, zeigt auch die Untersuchung von Austerschulte [AUS13]. Er ermittelte im Rahmen einer Studie, dass durch eine Auflösung von  $0,5^\circ$  der Nutzungsgrad des

blendfreien Fernlichts ansteigt. Er schrieb allerdings auch, dass „die Aktivierung nicht wesentlich weiter ansteigt, wenn eine noch feinere Auflösung der Segmente gewählt wird.“ Moisel [MOI15] zeigte in seiner Ausarbeitung ebenfalls, dass für eines blendfreien Fernlicht eine Auflösung von  $0,1^\circ$  ausreichend ist.

### 5.5 KONTRAST

Die im den vorigen Kapiteln ermittelten Werte der Auflösung beziehen sich auf ein Pixel mit einem sogenannten „Top“ Profil. Das bedeutet, dass die Kanten unendlich steil sind, womit die Auflösung präzise von Kante zu Kante definiert ist. Üblicherweise ist der Verlauf zwischen hell und dunkel nicht unendlich steil sondern folgt einem gaußähnlichen Profil. Dies führt dazu, dass die Definition der Auflösung an ein bestimmtes Kriterium gebunden ist. Ein übliches Maß zur Beschreibung der Auflösung ist die Halbwertsbreite welche im Englischen auch als „Full Width at Half Maximum“ (FWHM) bezeichnet wird. Für Kraftfahrzeugscheinwerfer ist dieses Maß jedoch nur bedingt geeignet, da für ein Fernlicht der Grenzwert von 350 cd gilt. Wird dieser Wert überschritten kann dies zu einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen. Deshalb wird die Auflösung am Schnittpunkt zu dieser Intensitätsgrenze gemessen. Zur korrekten Beschreibung der Auflösung wird in dieser Arbeit die Anzahl der Linienpaare betrachtet, die innerhalb eines Grads dargestellt werden können. Dabei ist sowohl die Kantenschärfe als auch der Kontrast zu berücksichtigen. Je mehr

Linien bei gleicher Kontrastanforderung dargestellt werden können, desto höher ist die Auflösung des Systems. Im Folgenden wird für das Abblend- und Fernlicht ein, dem Anforderungen entsprechender, Kontrast sowie eine Anzahl von Linienpaare definiert.

Zur Beschreibung des Kontrasts wird auf den sogenannten Michelson-Kontrast  $K_m$  zurückgegriffen. Dieser berechnet sich gemäß Gleichung (5.25).

$$K_m = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \text{ mit } 0 < K_m < 1 \quad (5.25)$$

$I_{max}$  und  $I_{min}$  geben hierbei die maximale beziehungsweise minimale Lichtstärke eines Pixels an.

Würde für Abblendlichtfunktionen, bei denen das Empfinden des Fahrers im Vordergrund steht und nicht die Blendung, der benötigte Kontrast mit 0,5 angenommen, müssten, um im Abblendlicht eine Auflösung von  $1/60^\circ$  zu erzielen, 30 Linienpaare pro Grad darstellbar sein. Gleichzeitig muss bei einem Kontrast  $K_m$  von 0,5 die untere Lichtstärke  $I_{min}$  auf einen Wert von 16.000 cd abfallen wenn der obere Lichtstärkewert  $I_{max}$  48.000 cd beträgt. Diese beiden Anforderungen sind über den kompletten Ausleuchtbereich und für jede definierte Entfernung im Abblendlicht einzuhalten.

Im Fernlichtbereich gilt, bedingt durch den Blendwert, für den Gesamtscheinwerfer eine minimale Lichtstärke von  $I_{min} = 350$  cd. Mit einer maximalen Lichtstärke  $I_{max}$  von 60.000 cd ergibt sich ein Michelson-Kontrast von  $K_m = 0,98$ . Wenn 5 Linienpaare pro Grad



umgesetzt werden sollen, ergibt sich daraus eine Auflösung von  $0,1^\circ$ .

Wie bereits im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, sinkt bei einer höheren Anzahl an Linienpaare pro Grad der Kontrast. Für eine Abblendlichtfunktion kann der Auflösung, respektive die Anzahl an Linienpaare, erhöht werden, da der Blendwert nicht das untere Limit definiert. Es ist noch festzuhalten, dass eine Optik den Kontrast zwar verschlechtern jedoch nicht verbessern kann. Die Auswirkung der Brennweite auf den Kontrast und die Auflösung kann der Arbeit von Reisinger entnommen werden [REI15b].



---

## Kapitel 6

# EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Durch den bewegten Laserspot können diverse optische Effekte wie ein Flimmern oder eine nicht kontinuierliche Darstellung der Lichtverteilung auftreten. In diesem Kapitel wird deshalb die Flimmerwahrnehmung, welche alle optischen Effekte abdeckt, in Abhängigkeit von der eingestellten Flimmerfrequenz, der Geschwindigkeit und der Pixelgröße bestimmt. Ziel ist es, unter Berücksichtigung der bestimmten Flimmerwahrnehmung, eine erforderliche maximale Pixelwiederholrate  $f_{\text{frame}}$  der Matrix-Scanner-Technologie festzulegen, um eine effiziente Systemauslegung zu gewährleisten.

## 6.1 EINLEITUNG

Die Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) ist eine wichtige Größe in der Matrix-Scanner-Technologie, da eine höhere FVF eine höhere Pixelwiederholrate  $f_{\text{frame}}$  erfordert. Dies führt wiederum zu einer entsprechend höheren Anzahl an Umkehrpunkten des Mikrospiegels. Außerdem muss der Mikrospiegel bei einer höheren Frequenz schneller beschleunigt werden. Ist dies aufgrund physikalischer

---

Grenzen nicht möglich, so folgt die Aufenthaltszeit nicht der gewünschten Verteilung. Dies führt zu einer höheren benötigten optischen Leistung.

Die FVF in statischen, aber auch der sogenannte Perlschnureffekt in dynamischen Systemen wurde bereits hinreichend untersucht, wie in der entsprechenden Fachliteratur nachzulesen ist [POL13] [POL15].

In dieser Arbeit wurden erstmals im Rahmen eines Feldversuchs die optischen Effekte untersucht, welche bei einem strahlgeführten System, das sich dynamisch im Verkehrsraum bewegt, entstehen können. Die Studie wurde in Zusammenarbeit mit Behr [BEH15] durchgeführt.

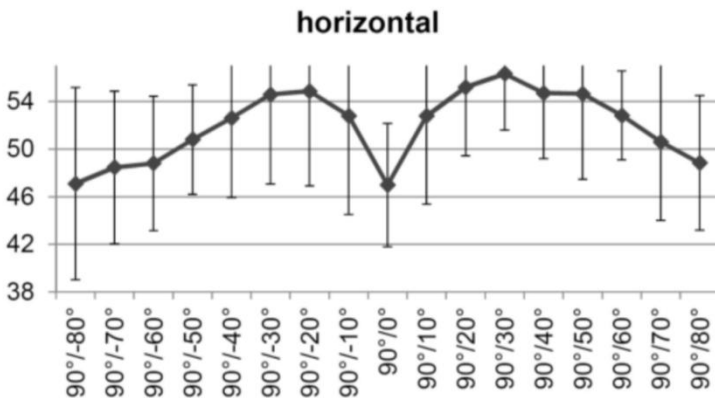
## 6.2 THEORIE

Es gibt drei unterschiedliche optische Effekte, die bei einer gepulsten und sich bewegenden Lichtquelle auftreten können. Der erste optische Effekt ist das sogenannte „flimmern“, welches auch von alten Röhrenmonitoren bekannt ist. Der zweite Effekt ist die nicht kontinuierliche Darstellung einer Bewegung, verursacht durch eine gepulste Lichtquelle, auch bekannt unter der Bezeichnung "Stroboskopeffekt". Der dritte Effekt ist der sogenannte Perlschnur-effekt. Dieser ist insbesondere bei niedrig gepulsten Heckleuchten im peripheren Sichtfeld wahrzunehmen. Eine genauere Definition der jeweiligen Effekte erfolgt in den nächsten Kapiteln.

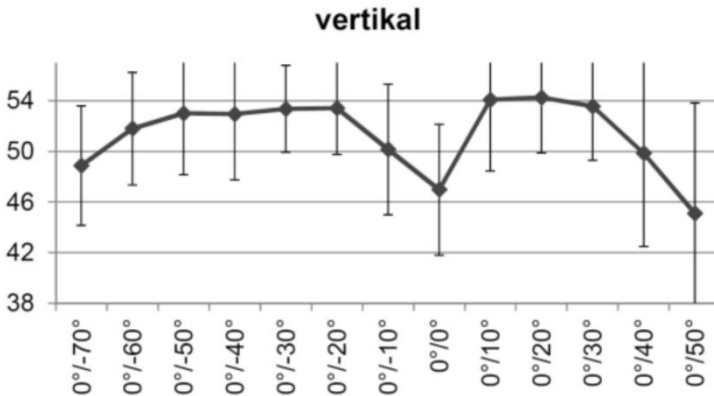
Im Vorfeld der Versuchsreihe ließ sich vermuten, dass die Versuchsteilnehmer die jeweiligen optischen Effekte nur schwer voneinander trennen können. Deshalb wurden die Probanden im Rahmen dieser Studie allgemein nach der sogenannten Flimmerwahrnehmung befragt, wobei diese alle optischen Effekte beinhalten kann.

### 6.2.1 FLIMMERN

Ein Flimmern wird wahrgenommen, wenn die Pixelwiederholrate  $f_{\text{frame}}$  die kritische Frequenz, auch Flimmerverschmelzungsfrequenz genannt, unterschreitet. Es sind dann zwar keine Einzelbilder wahrnehmbar, jedoch wird ein unangenehmes Flimmern vom Probanden bemerkt.



**Abbildung 6.1:** Darstellung der peripheren FVF in Abhängigkeit des horizontalen Sichtfelds [MÜH13].



**Abbildung 6.2:** Darstellung der peripheren FVF in Abhängigkeit des vertikalen Sichtfelds [MÜH13].

Die FVF ist abhängig vom fovealen und peripherem Sehen, wobei sowohl im horizontalen als auch im vertikalen Sichtfeld die FVF zunächst ansteigt, dann aber wieder abfällt wie aus der Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 ersichtlich ist. Außerdem ist die FVF von der Lichtstärke abhängig [KOC15].

### 6.2.2 STROBOSKOPEFFEKT

Der Stroboskopeffekt ist in einem dynamischen System beobachtbar. Zu sehen ist er, wenn ein bewegtes Objekt durch eine gepulst betriebene Lichtquelle beleuchtet wird. Die Bewegung des Objekts erscheint für einen Beobachter dadurch nicht kontinuierlich. Die Frequenz ab der ein Stroboskopeffekt wahrnehmbar ist, hängt von

der Bewegungsgeschwindigkeit des Objektes ab. Deshalb wird die Fahrzeuggeschwindigkeit in den Fahrversuchen variiert.

### 6.2.3 PERLSCHNUREFFEKT

Der Perlschnureffekt (PSE) ist dem Stroboskopeffekt sehr ähnlich, da die Bewegung einer Lichtquelle ebenfalls nicht kontinuierlich erscheint. Die Ursache ist jedoch eine andere, da der Perlschnureffekt erst dann wahrnehmbar ist, wenn das Auge schnelle Bewegungen vollzieht. Dies führt dazu, dass das Netzhautabbild einer Lichtquelle als unterbrochene Linie dargestellt wird. Laut Strauß [STR07] ist der PSE ab einer Grenzfrequenz  $f_{PSE}$  von 220 Hz nicht mehr wahrnehmbar. Die Grenzfrequenz  $f_{PSE}$  des PSE ist von der Ausdehnung der Lichtquelle  $l$ , dem Auflösungsvermögen des Auges  $\psi_{\text{Auge}}$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  zwischen dem Auge und der Lichtquelle gemäß Gleichung (6.1) berechenbar [STR07].

$$f_{PSE} = \frac{\omega}{l + \psi_{\text{Auge}}} \quad (6.1)$$

## 6.3 HYPOTHESEN

Im Rahmen des Feldversuches sind vier Hypothesen zu untersuchen, welche der Fragestellungen nachgehen, ob die Flimmerwahrnehmung von der eingestellten Frequenz, der gefahrenen Geschwindigkeit oder der Pixelgröße abhängig ist. Die

Nullhypothesen besagen, dass die Unterschiede zwischen zwei Stichproben rein zufällig sind. Im folgenden Abschnitt sind vier Nullhypothesen formuliert.

H<sub>0,1</sub>: Die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt ist nicht von der Geschwindigkeit abhängig.

H<sub>0,2</sub>: Die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt ist nicht von der Auflösung des Pixellichtsystems abhängig.

H<sub>0,3</sub>: Die Größe der reflektierenden Fläche hat keine Auswirkung auf die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt.

H<sub>0,4</sub>: Das Alter hat keinen Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt.

Wenn die statistischen Untersuchungen ergeben, dass die jeweilige Nullhypothese abgelehnt wird, so ergeben sich die Alternativhypothesen. Diese sind wie folgt definiert:

H<sub>1,1</sub>: Die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt ist von der Geschwindigkeit abhängig.

H<sub>1,2</sub>: Die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt ist von der Auflösung abhängig.

H<sub>1,3</sub>: Die Größe der reflektierenden Fläche hat eine Auswirkung auf die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt.

H<sub>1,4</sub>: Das Alter hat einen Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt.



Es handelt sich hierbei um zweiseitige Alternativhypothesen, da die Stichproben sowohl nach oben als auch nach unten abweichen können.

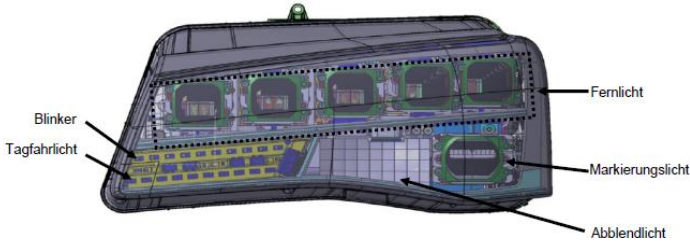
### **6.4 VERSUCHSDESIGN**

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Beschreibung des Versuchsträgeraufbaus sowie des Versuchsablaufs. Darüber hinaus wird das Probandenkollektiv beschrieben und die Aufnahme der Messdaten erläutert.

#### **6.4.1 VERSUCHSTRÄGER**

Die Herausforderung des Feldversuchs besteht darin, die Flimmerwahrnehmung von Probanden zu untersuchen, ohne einen Matrix Scanner Scheinwerfer zur Verfügung zu haben. Deshalb musste für die experimentelle Untersuchung ein LED Scheinwerfer entsprechend umgerüstet werden, damit die Bewegung des Laserspots anhand von sequentiell geschalteten LEDs reproduzierbar war. Als Scheinwerfer diente der im BMBF Förderprojekt „SEEL“ [BER14a] entwickelte mehrzeilige Versuchsscheinwerfer, welcher in Abbildung 6.3 dargestellt ist. Der Scheinwerfer hat fünf Module mit jeweils vier Zeilen und fünf Spalten und somit eine Auflösung von 100 Pixeln. Der Umbau des Scheinwerfers sowie die Entwicklung

der entsprechenden Ansteuerung erfolgte im Rahmen der Masterarbeit von Koch [KOC15].



**Abbildung 6.3:** Versuchsscheinwerfer des „SEEL“ Förderprojekts [BER14a].

Aus der sequentiellen Ansteuerung der LEDs folgt eine entsprechend kurze Aktivierungszeit der jeweiligen LED. Dadurch sinkt gemäß dem Talbot'schen Gesetz aus Gleichung (3.1) die wahrgenommene Leuchtdichte. Damit die Lichtstärke eines Scheinwerfers erreicht werden kann, wurden die in den SEEL Scheinwerfer implementierten LEDs vom Typ "Osram CEUN" mit einer Kantenlänge von  $0,87 \text{ mm} \times 0,87 \text{ mm}$  und einem Lichtstrom von  $110 \text{ lm}$ , bei einem Strom von  $350 \text{ mA}$  durch eine LED vom Typ „Osram CEUP“ getauscht. Somit kann ein Lichtstrom von  $425 \text{ lm}$  bei einem Strom von  $1,4 \text{ A}$  erzielt werden. Die Größe der emittierenden Fläche beträgt  $1,05 \text{ mm} \times 1,05 \text{ mm}$ . Der gestiegene Platzbedarf der LED führt dazu, dass aufgrund der limitierten Platinenfläche die Anzahl der Zeilen von vier auf drei Zeilen reduziert werden muss.

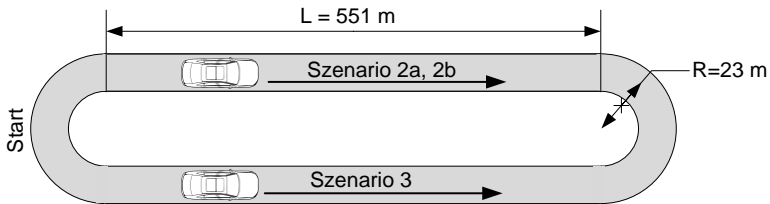
### 6.4.2 ANSTEUERUNG

Jede LED wird diskret von einem Treiber angesteuert. Dadurch ist es möglich, diese mit einem beliebigen Steuersignal zu betreiben. Allerdings ist die Frequenz, mit der die einzelnen LEDs ansteuerbar sind, aufgrund der Ansteuerelektronik auf 120 Hz beschränkt. Die sequentielle Ansteuerung der LEDs erfolgte zeilenweise von links nach rechts. Der Ausleuchtungsbereich des Scheinwerfers beträgt horizontal  $\alpha_{RS} = [-12^\circ, +18^\circ]$  und vertikal  $\beta_{RS} = [-1^\circ, +2^\circ]$ .

In jedem Scheinwerfer sind 75 LEDs ansteuerbar. Im zentralen Sichtfeld ist aufgrund des optischen Aufbaus des SEEL Scheinwerfers die Lichtverteilung von rechtem und linkem Scheinwerfer überlagert. Die gemessene Beleuchtungsstärke außerhalb des Überlappungsbereichs beträgt bei einem Strom von 1,4 A 32 lx in 25 m.

### 6.4.3 TESTSTRECKE

Die Fahrversuche wurden auf einem abgeschlossenen Audi Prüfgelände in Neuburg durchgeführt. Die Teststrecke ist in der Abbildung 6.4 dargestellt.



**Abbildung 6.4:** Darstellung der Teststrecke.

Die Versuche wurden im Zeitraum vom 17.11.2014 bis zum 01.12.2014 jeweils zwischen 17.45 Uhr und 22.15 Uhr durchgeführt. Die gemessenen horizontalen Umfeldbeleuchtungsstärken betragen jeweils zu Versuchsbeginn zwischen  $0,012 \text{ lx}$  und  $1,87 \text{ lx}$  bei einem Mittelwert von  $0,25 \text{ lx}$ . 33 % der Testfahrten fanden bei leicht feuchter Straße statt. Bei Regen oder nasser Fahrbahn wurden keine Fahrversuche durchgeführt.

### 6.4.4 MESSDATEN AUFNAHME

Die Erfassung der Messdaten erfolgte bei dieser Studie durch eine Befragung der Probanden. Diese wurde stets nach jeder Frequenz-, Pixel- und Geschwindigkeitseinstellung, gemäß des im Anhang C.1 aufgeführten Fragebogens durchgeführt. Der Proband musste die Flimmerwahrnehmung in fünf Kategorien von "gar nicht" bis "leicht", "mittel", "stark" und "sehr stark" einordnen. Diese Angaben sind in der hier aufgeführten Reihenfolge von 0 bis 4 codiert. Es wurde eine unipolare Skala verwendet, da die Probanden bewerten

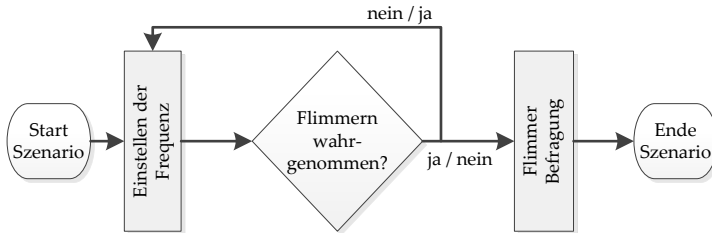
sollten, wie stark oder schwach eine Flimmerwahrnehmung ist und nicht ob das Flimmern positiv oder negativ ist [MEN15]. Außerdem ist im Fragebogen auf die Verwendung einer neutralen Mittelkategorie verzichtet worden, da nach Moosbrugger [MOO12] die Probanden bei Fragebögen zu dieser Kategorie tendieren. Um Abhängigkeiten von der Ablaufreihenfolge zu vermeiden, wurde diese für jeden Probanden verändert. Eine Darstellung der Ablaufreihenfolge ist im Anhang C.2 zu finden.

### 6.4.5 VERSUCHSABLAUF

Der Versuchsablauf ist in drei Szenarien unterteilt worden. Im ersten Szenario wurde in einem statischen Versuch die Flimmerverschmelzungsfrequenz ermittelt. In Szenario zwei und drei wurde in einer dynamischen Fahrt die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit verschiedener Parameter ermittelt. Vor Beginn der Szenarien wurde jeder Proband befragt. Die Auswertung der Vorbefragung ist im nachfolgenden Kapitel 6.4.6 zu finden. Anschließend wurde auf der Teststrecke eine Proberunde gefahren, damit sich die Fahrer an das Fahrzeug und die Funktionsweise des Tempomaten gewöhnen konnten.

Im ersten Szenario wurde eine Wand durch den Versuchsscheinwerfer beleuchtet und die Pixelwiederholfrequenz, die im Folgenden als Frequenz beschrieben wird, zwischen 30 Hz und 90 Hz variiert. Der Frequenzbereich wurde durch Vorversuche

festgelegt. Ziel dieses Szenarios ist es, die individuelle Flimmerfrequenz von jedem Probanden im Stand zu ermitteln. Jedem Probanden wurde eine auf- und absteigende Frequenzreihenfolge gezeigt. Erkannte der Proband bei der eingestellten Frequenz ein Flimmern so bestätigte er dies durch Drücken einer Taste. Als kritische Frequenz des Probanden wurde die niedrigere Frequenz beider Durchläufe vermerkt. Der Ablauf des ersten Szenarios ist in Abbildung 6.5 dargestellt.



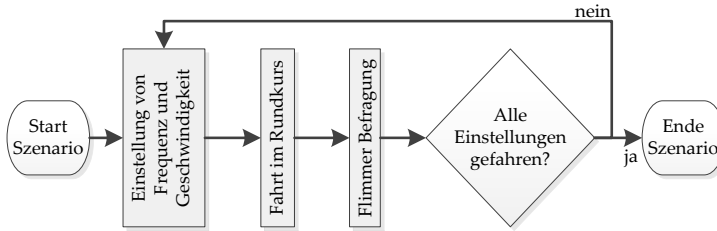
**Abbildung 6.5:** Ablaufdiagramm von Szenario 1, bei dem die absteigende / aufsteigende Flimmerwahrnehmung ohne Dynamik ermittelt wird.

Das zweite Szenario war in Szenario 2a und Szenario 2b unterteilt. In Szenario 2a wurde die Teststrecke im Uhrzeigersinn durchfahren. Der Proband fuhr auf der mittleren Spur, wie aus der Abbildung 6.6 ersichtlich wird. Auf der linken und rechten Spur befanden sich zwei, mit der retroreflektierenden Folie "3M Reflexfolie 580 E weiß" beklebte Transporter. Die beklebte Fläche betrug 4,21 m<sup>2</sup>. Die Folie simuliert hierbei die Reflektion an einem Verkehrsschild.



**Abbildung 6.6:** Darstellung des Szenarios 2 [BEH15].

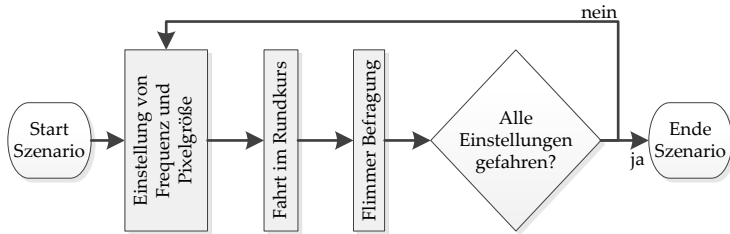
In jedem Durchlauf wurde sowohl die Geschwindigkeit als auch die Frequenz variiert. Die Probanden fuhren sowohl 50 km/h als auch 100 km/h. Die Geschwindigkeit wurde, wie auch in den anderen Testszenarien, mittels eines Tempomaten eingestellt. Die abgeprüften Frequenzen waren 44 Hz, 48 Hz, 52 Hz, 56 Hz und 60 Hz. Dadurch ergaben sich zehn Testrunden. Der Ablauf ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Durch das Szenario 2a kann die aufgestellte Nullhypothese  $H_{0,1}$  untersucht werden, die besagt, dass die Geschwindigkeit keinen Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung hat.



**Abbildung 6.7:** Ablaufdiagramm von Szenario 2a, bei dem die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt wird.

In Szenario 2b wurde die Pixelgröße variiert. Dazu fuhr der Proband im Uhrzeigersinn an zwei Transportern vorbei. In einer ersten Fahrt wurden die Pixel mit der höchsten Auflösung von 75 Pixeln geschaltet was als „feine“ Auflösung bezeichnet wird. In einem zweiten Durchlauf wurden die LEDs zu fünfer Blöcken zusammengeschaltet wodurch sich eine Auflösung von 15 Pixeln ergibt. In diesem Zusammenhang wird von einer „groben“ Auflösung gesprochen. Die Pixelwiederholrate blieb zwischen der feinen und groben Auflösung konstant. Für beide Fahrten wurde die im ersten Szenario ermittelte individuelle Referenzfrequenz eingestellt. Zusätzlich zur Pixelgröße erfolgte auch eine Variation der Geschwindigkeit. Dadurch ergaben sich vier Runden die der Proband in diesem Szenario fahren musste. Der Ablauf ist in Abbildung 6.8 zu sehen. Ziel des Szenarios 2b war es, die aufgestellte Nullhypothese  $H_{0,2}$  zu untersuchen, welche besagt, dass die Pixelgröße in einer dynamischen Fahrt keinen Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung hat.





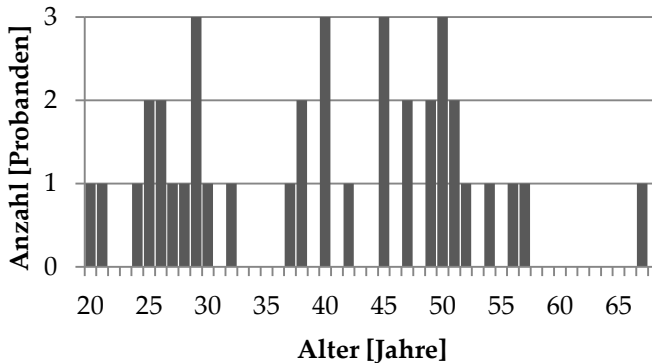
**Abbildung 6.8:** Ablaufdiagramm von Szenario 2b, bei dem die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Pixelgröße ermittelt wird.

Im dritten Szenario wurde die Teststrecke entgegen des Uhrzeigersinns befahren. Das Fahrzeug fuhr auf der rechten Spur. Am rechten Straßenrand waren acht, mit der retroreflektierenden Folie „3M Reflexfolie 580 E weiß“ beklebte Leitpfosten aufgestellt. Die Leitpfosten hatten eine Höhe von 120 cm, sowie eine Breite von 20 cm. Daraus ergibt sich eine Fläche von 0,24 m<sup>2</sup>. Es wurden die Geschwindigkeiten 40 km/h, 70 km/h und 100 km/h sowie die Frequenzen von 30 Hz, 40 Hz, 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz und 120 Hz eingestellt. Daraus ergaben sich 18 zu fahrende Runden. Der Ablauf ist der Abbildung 6.7 zu entnehmen.

#### 6.4.6 PROBANDENKOLLEKTIV

Am Feldversuch nahmen insgesamt 38 Probanden teil. Bei der Auswahl der Probanden wurde berücksichtigt, dass eine möglichst heterogene Altersstruktur abgebildet wird. Aus der Abbildung 6.9

ist ersichtlich, dass 18 Probanden älter als 40 Jahre und 20 Probanden jünger als 40 Jahre sind.



**Abbildung 6.9:** Darstellung des Probandenalters.

Das Geschlecht der Probanden verteilte sich zu 37 % auf weibliche und zu 63 % auf männliche Probanden. Rund 61 % der Teilnehmer hatten eine Sehhilfe. In einer durchgeführten Vorbefragung gab ein Proband an, einen Sehfehler aufgrund eines nicht vollständig ausgebildeten Sehnervs zu haben. Zwei Probanden hatten eine Laserkorrektur und ein Versuchsteilnehmer schielte. Diese Versuchsteilnehmer wurden in der Auswertung hinsichtlich der Plausibilität ihrer Antworten gesondert untersucht.

Die Probanden hatten durchschnittlich 21 Jahre ihren Führerschein, wobei die Standardabweichung bei 11 Jahren lag. Die Probanden hatten eine aktuelle jährliche Fahrleistung zwischen 8.000 km und 60.000 km. 95 % aller Probanden fahren täglich oder mehrmals die

Woche bei Dunkelheit. Damit die Probanden an die Farbtemperatur des Versuchsscheinwerfers gewöhnt sind, wurde bei der Auswahl der Probanden darauf geachtet, dass diese ein Fahrzeug mit einer entsprechenden Beleuchtungseinrichtung besitzen. Deshalb fahren über 92 % der Probanden ein Fahrzeug mit Xenon- oder LED Technologie.

### **6.5 ANALYSE DER DATEN**

In diesem Unterkapitel werden die aufgenommenen Daten analysiert, um die aufgestellten Thesen zu überprüfen.

#### **6.5.1 DATENFILTERUNG**

Vor der Auswertung der Daten wurden diese zunächst analysiert, um anschließend eine Filterung vornehmen zu können. In den Auswertungen wird davon ausgegangen, dass Probanden die entweder nie oder immer ein Flimmern wahrgenommen haben, die optische Wahrnehmung von Flimmern nicht oder unvollständig verstanden haben. Deshalb wurden die Daten der Probanden TN01, TN06, TN07 in der Auswertung nicht berücksichtigt. Als Grenzwert wurde eine Varianz von weniger als 0,1 festgelegt.

Probanden, welche aufgrund eines Mess- oder Protokollierfehlers eine unvollständige Datenreihe innerhalb eines Szenarios aufweisen, werden bei den Auswertungen, welche dieses Szenario

berücksichtigen, ausgenommen. Im Szenario 2a betraf dies die Probanden TN01, TN07 und TN25, im Szenario 2b den Probanden TN35 und in Szenario 3 den Probanden TN08. Somit ergibt sich für das Szenario 1 eine verwendbare Stichprobengröße von  $n_P = 35$  und für das Szenario 2a, 2b und 3 eine Größe von  $n_P = 34$ .

### 6.5.2 STATISTISCHE VERFAHREN

Die Überprüfung der aufgestellten Nullhypothesen erfolgte durch eine Varianzanalyse mit Messwiederholung, welche ein parametrisches Verfahren darstellt. Diese prüft, ob die Varianzen zwischen den Datenreihen größer sind als die Varianzen innerhalb der Datenreihe. In einigen Fällen wurde auch ein Paarvergleich durchgeführt der auf dem T-Test beruht. Als Ergebnis der Varianzanalyse und des T-Tests ergibt sich unter anderem die Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$ .

Dabei bedeuten Werte die kleiner als ein definierter Schwellwert  $\alpha$  sind, dass die beobachtbaren Unterschiede als „signifikant“ bezeichnet werden können und somit der aufgestellten Nullhypothese widersprechen, sie also ablehnen. Als Schwellwert für das sogenannte Signifikanzniveau hat sich  $\alpha = 0,05$  etabliert, welcher auch in dieser Arbeit verwendet wird. Da es sich, wie bereits in Kapitel 6.3 beschrieben wurde, um eine zweiseitige Nullhypothese handelt, ist das Signifikanzniveau zu halbieren. Somit ist  $\alpha = 0,025$ . Wenn somit der resultierende  $p$ -Wert unterhalb von  $\alpha = 0,025$  liegt,

so wird die Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen.

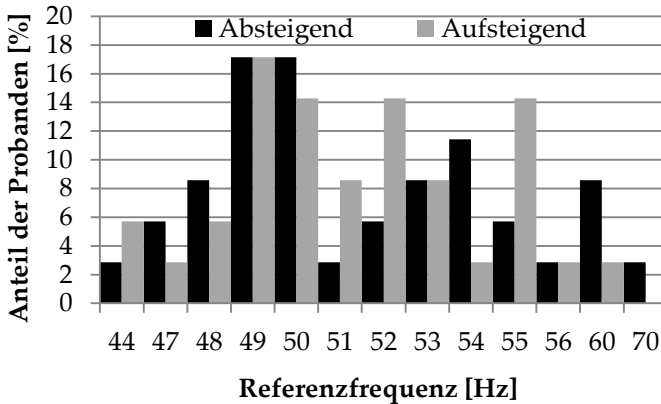
Die für dieses parametrische Verfahren notwendige Bedingung ist, dass die aufgenommenen Daten einer Normalverteilung unterliegen. Dies wird mit Hilfe des Kolmogorov Smirnov Tests überprüft. Mit diesem Test wird der größte Abstand zwischen der aufgenommenen Verteilung der Messwerte von einer Normalverteilung ermittelt. Die Nullhypothese dieses Tests geht von der Normalverteilung der Daten aus. Wenn somit der Kolmogorov Smirnov Test einen p-Wert von weniger als 0,05 ergibt, bedeutet dies, dass die Messwerte nicht normalverteilt sind. Die Überprüfung von allen relevanten Datensätzen ergab, dass diese keiner Normalverteilung unterliegen. Dies könnte an der kleinen Stichprobe und der diskreten Bewertung der Flimmerwahrnehmung liegen. Zur weitergehenden Analyse sollten nach gängiger Lehrmeinung nichtparametrische Tests verwendet werden. In der Praxis ist es jedoch üblich, trotz der fehlenden Normalverteilung der Daten parametrische Tests zu verwenden, da es keinen vergleichbaren nicht-parametrischen Test gibt, der die Varianzanalyse mit Messwiederholung ersetzen könnte. Außerdem können die Resultate nichtparametrischer Tests weniger aussagekräftig sein als die parametrischer Art und der Fehler, der durch das Fehlen der Normalverteilung der Daten entsteht, kann vernachlässigt werden [BOR05] [MIC14b].

### 6.5.3 DESKRIPTIVE STATISTIK

In diesem Kapitel werden die statistischen Zusammenhänge grafisch dargestellt und die Nullhypothesen auf deren Ablehnung hin mit den notwendigen parametrischen Verfahren überprüft.

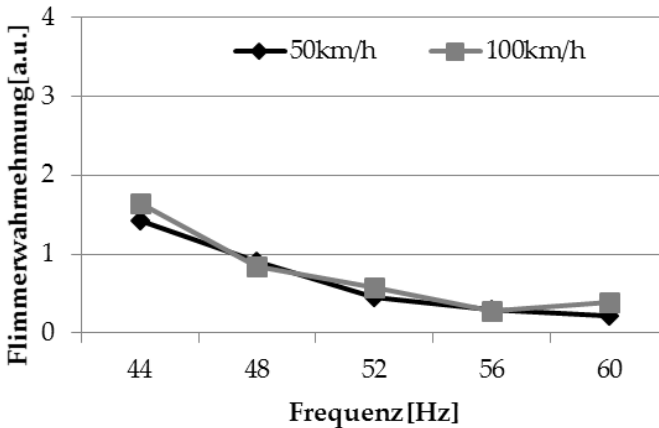
Grundsätzlich konnte über alle aufgenommenen Datenreihen eine signifikante Abhängigkeit der Flimmerwahrnehmung von der eingestellten Pixelwiederholrate festgestellt werden. Dieser triviale Befund bestätigt, dass eine höhere Pixelwiederholrate mit einer geringeren subjektiven Flimmerwahrnehmung einhergeht.

Die Frequenz ab der ein Proband im statischen Fall ein Flimmern wahrnimmt, welche auch als persönliche Referenzfrequenz bezeichnet wird, wurde im ersten Szenario ermittelt. In Abbildung 6.10 sind die prozentualen Verteilungen der Referenzfrequenzen dargestellt. Die Auswertung der Daten ergab einen Mittelwert der Referenzfrequenz von 52 Hz bei absteigender Darstellung und bei einer aufsteigenden Darstellung von 46 Hz.



**Abbildung 6.10:** Darstellung der Referenzfrequenz für aufsteigenden und absteigenden Frequenzverlauf mit  $n_P = 35$ .

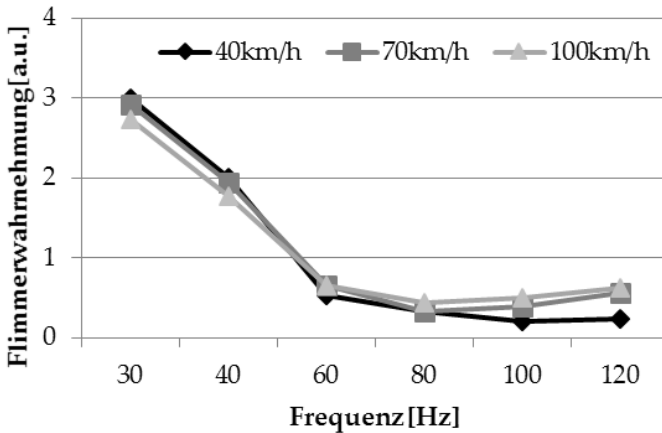
Die Nullhypothese  $H_{0,1}$ , welche besagt, dass die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt nicht von der Geschwindigkeit abhängig ist, wird anhand des Szenarios 2a und Szenario 3 abgeprüft. In Szenario 2a werden zwei Geschwindigkeiten und Frequenzen von 44 Hz bis 60 Hz gefahren und im dritten Szenario drei Geschwindigkeiten und Frequenzen von 30 Hz bis 120 Hz. In der Abbildung 6.11 ist für Szenario 2a die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit zu sehen.



**Abbildung 6.11:** Darstellung der Flimmerwahrnehmung mit  $n_P = 34$  Probanden für Szenario 2a in Abhängigkeit der Frequenz und der Geschwindigkeit.

Aus der Darstellung ist keine logische Schlussfolgerung der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit möglich. Der Test auf signifikante Unterschiede zwischen 50 km/h und 100 km/h, ergab einen Wert von  $p = 0,426$ . Somit konnte die Nullhypothese  $H_{0,1}$  anhand dieses Szenarios nicht widerlegt werden. In der Abbildung 6.12 ist für Szenario 3 die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit von drei Geschwindigkeiten zu sehen.

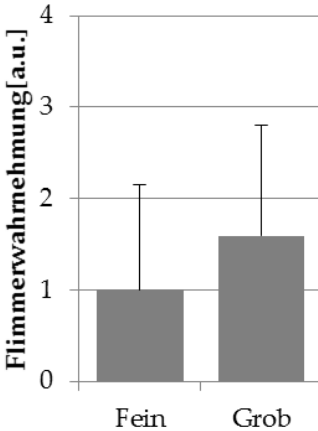




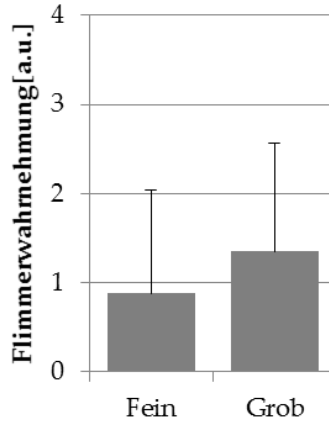
**Abbildung 6.12:** Darstellung der Flimmerwahrnehmung mit  $n_P = 34$  Probanden für Szenario 3 in Abhängigkeit der Frequenz und der Geschwindigkeit.

Der Test auf Signifikanz zwischen den drei Geschwindigkeiten 40 km/h, 70 km/h und 100 km/h ergab jeweils einen p-Wert von 1,0. Somit ist die Nullhypothese  $H_{0,1}$  auch mittels des dritten Szenarios nicht widerlegbar.

Die Hypothese  $H_{0,2}$ , welche besagt, dass die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt nicht von der Auflösung des Pixellichtsystem abhängig ist, wird anhand des Szenarios 2b abgeprüft. Die Probanden fahren mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten und zwei verschiedenen Pixelgrößen, wobei die Flimmerwahrnehmung der Probanden abgefragt wurde. Für jeden Probanden wurde die individuelle Referenzfrequenz eingestellt.



**Abbildung 6.13:** Darstellung der Unterschiede in der Flimmerwahrnehmung bei 50 km/h und einer feinen beziehungsweise groben Pixelauflösung für  $n_P = 34$ .



**Abbildung 6.14:** Darstellung der Unterschiede in der Flimmerwahrnehmung bei 100 km/h und einer feinen beziehungsweise groben Pixelauflösung für  $n_P = 34$ .

Aus der Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14 lässt sich ableiten, dass bei größeren Pixeln die Probanden eine höhere Flimmerwahrnehmung haben. Diese Annahme bestätigt auch die Prüfung auf Signifikanz, welche einen p-Wert von 0,003 ergab. Dieser liegt unter dem oben definierten Schwellwert von 0,025. Eine Bonferroni-Korrektur zur Vermeidung der Fehlerkumulierung muss nicht verwendet werden, da die aufgenommenen Daten des Szenarios 2b ausschließlich für die Nullhypothese  $H_{0,2}$  verwendet wurde.

Die Nullhypothese wird also abgelehnt und somit gilt die Alternativhypothese, welche besagt, dass die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt von der Auflösung abhängig ist.

Zur Abschätzung der Praxisrelevanz wird die standardisierte Differenz  $d$  berechnet. Aus dieser lässt sich gemäß der Definition von Cohen die Effektstärke ermitteln. Cohen gibt hierbei an, dass für  $d \geq 0,2$  ein kleiner Effekt für  $d \geq 0,5$  ein mittlerer Effekt und für  $d \geq 0,8$  ein großer Effekt zu erwarten ist [COH88].

Die standardisierte Differenz berechnet sich aus der Differenz der Mittelwerte der Flimmerwahrnehmung von groben Pixeln  $\bar{x}_g$  und feinen Pixeln  $\bar{x}_f$  geteilt durch die Summe der mittleren Standardabweichungen der Flimmerwahrnehmung der groben Pixel  $\bar{\sigma}_g$  und feinen Pixel  $\bar{\sigma}_f$ . Die standardisierte Differenz  $d$  ist somit größer, wenn die Differenz der Mittelwerte größer ist oder die mittlere Standardabweichung kleiner wird [JEB12].

$$d = \frac{2|\bar{x}_g - \bar{x}_f|}{\bar{\sigma}_g + \bar{\sigma}_f} \quad (6.2)$$

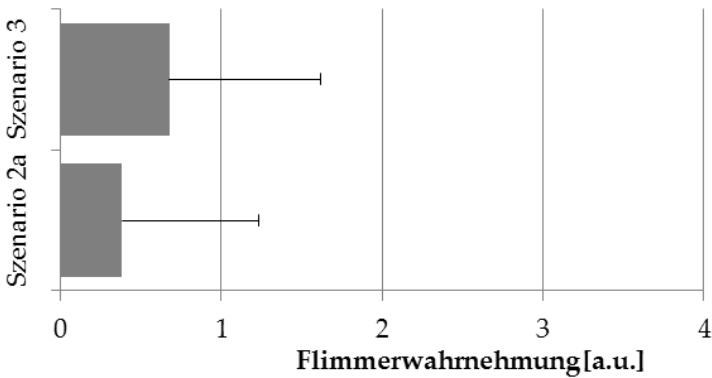
Die Mittelwerte und die Standardabweichungen sind der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

**Tabelle 6.1:** Darstellung des Mittelwerte und der Standardabweichungen der Flimmerwahrnehmung für feine und grobe Pixel und zweier verschiedener Geschwindigkeiten.

	Mittelwert $\bar{x}$	Standardabweichung $\bar{\sigma}$
50 km/h, fein	1,000	1,154
50 km/h, grob	1,588	1,209
100 km/h fein	0,882	1,094
100 km/h grob	1,352	1,276

Werden die Werte aus obiger Tabelle eingesetzt so ergibt sich für 50 km/h eine Effektstärke  $d$  von 0,49 und für 100 km/h ist  $d = 0,39$ . Laut Cohen unterliegt die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Pixelgröße somit einem mittleren Effekt.

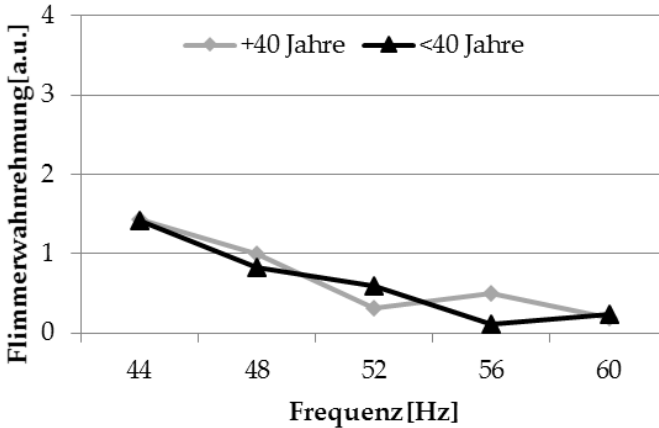
Die Nullhypothese  $H_{0,3}$  besagt, dass die Größe der reflektierenden Fläche keine Auswirkung auf die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt hat. Um hier den Nachweis zu erbringen, wurde das Szenario 2a mit dem Szenario 3 bei gleicher Geschwindigkeit und Frequenz verglichen. Es gab eine Kombination die einen Vergleich ermöglichte. Die gewählte Frequenz war 60 Hz und 100 km/h. Aus der Abbildung 6.15 wird ersichtlich, dass der Mittelwert des Szenarios 2a bei 0,39 mit einer Standardabweichung von 0,85 liegt. Der Mittelwert des dritten Szenarios hat einen Mittelwert von 0,65 bei einer Standardabweichung von 0,95.



**Abbildung 6.15:** Vergleich der Flimmerwahrnehmung zwischen einem großen Reflexionsbereich aus Szenario 2a und einem kleinen Reflexionsbereich aus Szenario 3 bei 60 Hz und 100 km/h.

Es lässt sich also vermuten, dass die Flimmerwahrnehmung bei größeren Objekten höher ist. Jedoch ergab der Test auf Signifikanz zwischen Szenario 2a und Szenario 3 einen p-Wert von 0,152. Somit wird die Nullhypothese  $H_{0,3}$  nicht widerlegt.

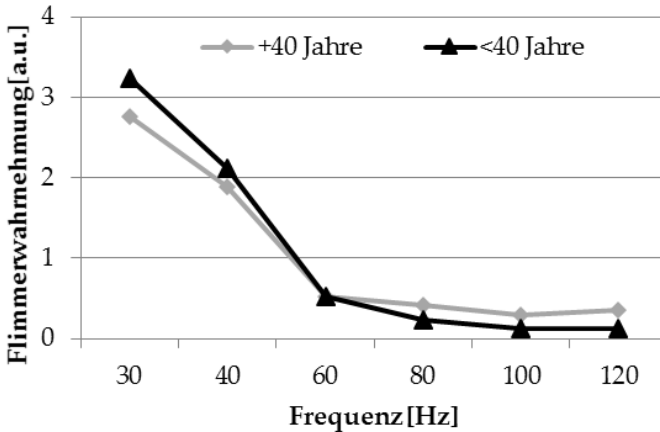
Die Nullhypothese  $H_{0,4}$  sagt aus, dass das Alter keinen Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung in einer dynamischen Fahrt hat. Dies wurde anhand mehrerer Szenarien abgeprüft. Im Szenario 2a wurden zwei Altersgruppen verglichen. In Abbildung 6.16 ist ein Vergleich der Flimmerwahrnehmung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h für zwei Altersgruppen zu sehen.



**Abbildung 6.16:** Vergleich der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit des Alters für das Szenario 2a bei 50 km/h mit einer Altersgruppe <40 mit  $n_P = 17$  und +40 mit  $n_P = 17$ .

Der Signifikanztest ergab einen p-Wert von 0,878 über alle Geschwindigkeiten und somit ist die Nullhypothese  $H_{0,4}$  anhand dieses Szenarios nicht widerlegbar.

In der Abbildung 6.6 ist eine altersabhängige Unterteilung des dritten Szenarios bei einer Geschwindigkeit von 40km/h zu sehen. Es ist kein einheitlicher Verlauf der Kennlinien ersichtlich. Werden die zwei Altersgruppen auf Signifikanz überprüft so ergibt sich für das Szenario 3 über alle Geschwindigkeiten betrachtet ein p-Wert von 0,569. Somit ist keine Signifikanz feststellbar. Die Nullhypothese  $H_{0,4}$  ist somit nicht widerlegbar.



**Abbildung 6.17:** Vergleich der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit des Alters für das Szenario 3 bei 40 km/h mit einer Altersgruppe <40 mit  $n_P = 17$  und +40 mit  $n_P = 17$ .

## 6.6 DISKUSSION

Generell waren in allen Szenarien signifikante Unterschiede der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Frequenz feststellbar. Eine höhere Frequenz resultiert somit in einer geringeren subjektiven Wahrnehmung des Flimmerns. Dieser scheinbar triviale Befund kann als „Manipulations Check“ gewertet werden, da prinzipiell das Flimmern in der Studie subjektiv wahrzunehmen war.

Die Auswertung verschiedener Szenarien ergab, dass die Flimmerwahrnehmung während der Fahrt nicht in einem signifikanten Zusammenhang zur Geschwindigkeit steht.

Die Nullhypothese  $H_{0,2}$  lässt sich widerlegen, da es signifikante Unterschiede der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Pixelgröße gibt. Somit kann schlussgefolgert werden, dass eine höhere Auflösung bei gleicher Frequenz zu einer geringeren Flimmerwahrnehmung führt.

Die Nullhypothese  $H_{0,3}$  konnte nicht widerlegt werden, denn es war kein signifikanter Unterschied zwischen der Flimmerwahrnehmung und der Größe der reflektierenden Fläche feststellbar. Somit ist aber auch bestätigt, dass ein Stroboskopeffekt, welcher bei einer kleinen Reflektionsfläche aufgrund einer Unterabtastung auftreten könnte, hier nicht zu beobachten war.

Die Nullhypothese  $H_{0,4}$  konnte nicht widerlegt werden. Laut dieser Versuchsreihe ist die Flimmerwahrnehmung somit unabhängig vom Alter, beziehungsweise in der Schlussfolgerung von der Sehleistung oder Fahrpraxis.

Die Einstellung der höchsten Frequenz von 120 Hz ergab eine mittlere Flimmerwahrnehmung von 0,235 bis 0,617, bei einer Standardabweichung von 0,740 bis 1,128. Somit ist nicht komplett auszuschließen, dass einzelne Probanden ein Flimmern wahrgenommen haben und die Frequenz von 120 Hz dient somit als Richtwert. In einer Anschlussstudie kann anhand eines ersten Prototypens des Matrix-Scanner-Moduls die exakte Pixelwiederholrate ermittelt werden.



---

## Kapitel 7

# MODELLBASIERTE AUSLEGUNG

Um das Matrix Scanner Modul unter dem Aspekt der Effizienz und des Nutzungsgrads optimal an die in Kapitel 5 und Kapitel 6 ermittelten Anforderungen anzupassen, werden in diesem Kapitel die entsprechenden Berechnungen aufgezeigt. Dabei werden die Betriebsart und die Ansteuerung des Mikrospiegels festgelegt, sowie die tatsächlich benötigte optische Leistung ermittelt.

### 7.1 LICHTVERTEILUNG

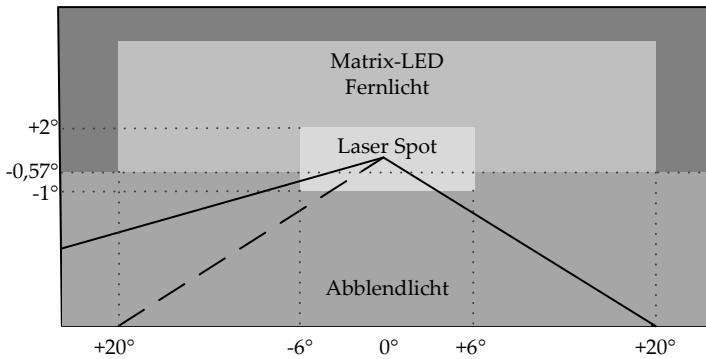
Das Matrix-Scanner-Modul soll in zukünftigen Serienfahrzeugen Verwendung finden. Deshalb wurde im Rahmen des BMBF Förderprojekts „iLaS“ [BUN14b] die Anzahl der Halbleiterlichtquellen auf sechs Laserdioden beschränkt. Als Laserlichtquelle wird eine blaue Laserdiode der Firma Osram, mit einer optischen Nennleistung von 2 W bei 25°, eingesetzt. Somit ergibt sich eine maximal verfügbare optische Leistung  $P_{\max}$  von 12 W. Aus den Vorabbetrachtungen und der Leistungsanalyse aus Kapitel 4.2 lässt sich ableiten, dass der Öffnungswinkel bei dieser reduzierten optischen Leistung limitiert ist. Mit dem bereit gestellten Lichtstrom kann eine

---

Abblend- und Fernlichtfunktion nicht gleichzeitig umgesetzt werden. Deshalb wurde im Rahmen des „iLaS“ Förderprojekts entschieden eine Fernlichtlösung zu realisieren.

Die Matrix-Scanner-Technologie eignet sich für die Umsetzung der in Kapitel 5.2.2 vorgestellten blendfreie Fernlichtfunktionen mit adaptivem Reichweiten- und Markierungslicht. Das Reichweitenlicht ist eine Erweiterung des im Audi R8 [AUD14] und dem BMW i8 [BMW14] eingeführten Laserspots und wird im Folgenden auch als "dynamischer Laserspot" bezeichnet. Durch den Einsatz der Matrix-Scanner-Technologie mit einem quasistatischen Betrieb, ist die Lichtstärke durch anpassen der Aufenthaltszeiten und der Amplitude „verschiebbar“. Gleichzeitig können Fahrzeuge aufgrund der intelligenten Ansteuerung der Laserdioden ausgeblendet werden.

Auf Basis der in Kapitel 5 ermittelten Werte, benötigt das Matrix-Scanner-Modul einen horizontalen Öffnungswinkel  $\alpha_a$  von  $12^\circ$ . Der vertikale Öffnungswinkel  $\beta_a$  beträgt gemäß Kapitel 5.3.3  $3^\circ$ . Der Aufsetzpunkt im Abblendlicht wird auf  $-1^\circ$  festgelegt. Dadurch kann die Leuchtdichte auf der Straße im Bereich der HDG durch den dynamischen Laserspot signifikant erhöht werden. Zur Ausleuchtung der Winkelbereiche außerhalb des Ausleuchtbereichs des Matrix-Scanner-Moduls, wird zusätzlich eine LED Matrix in den Scheinwerfer integriert. Die Gesamtlichtverteilung ist in Abbildung 7.1 zu sehen.

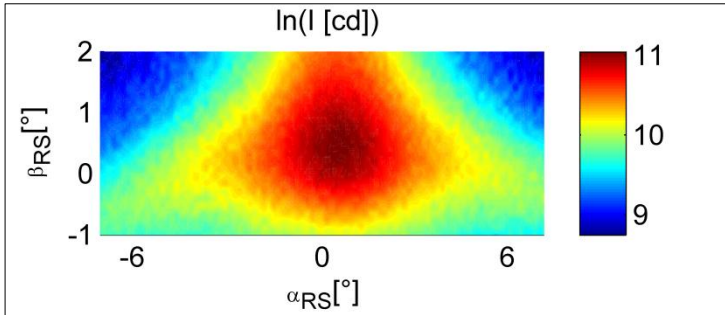


**Abbildung 7.1:** Ausleuchtbereich des Gesamtscheinwerfers, bestehend aus einem LED Abblendlicht, einem Matrix LED Fernlicht und einem dynamischen Laserspot.

Der Gradient zwischen dem dynamischen Laserspot und des Matrix LED Fern- und Abblendlichts ist so zu wählen, dass ein homogener Übergang gewährleistet ist. In Abbildung 7.2 ist die Lichtstärkeverteilung des Matrix-Scanner-Moduls ohne Anwendung einer Ausblend- oder Markierungsfunktionalität dargestellt.

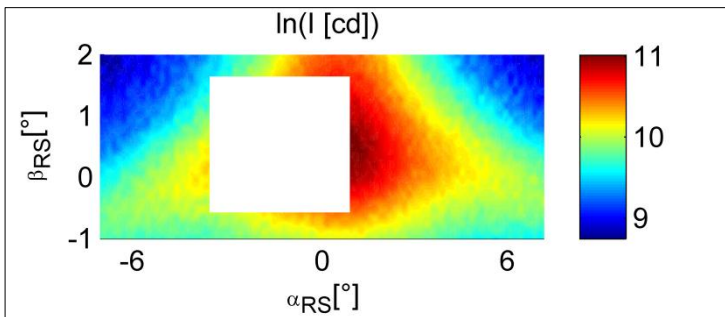
In den folgenden Abbildungen sind für drei verschiedene Lichtfunktionen die jeweiligen Lichtstärkeverteilungen visualisiert. Die Parameter für die Lichtfunktion 2 und 3 können dem Kapitel 4.2 entnommen werden.

In der Abbildung 7.2 ist der Laserspot im statischen Betrieb zu sehen. Die maximale Lichtstärke beträgt  $62.276 \text{ cd}$  und der Lichtstrom in der Ziellichtverteilung beträgt  $282 \text{ lm}$ .



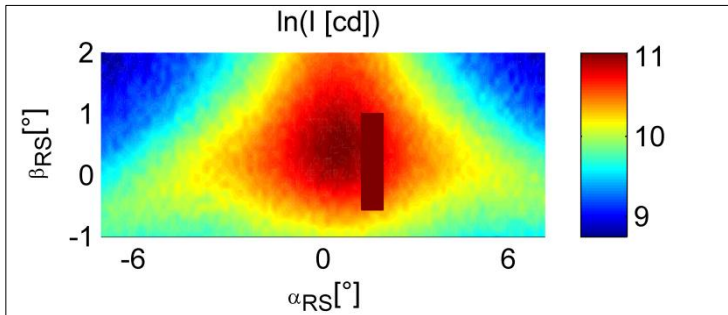
**Abbildung 7.2:** Darstellung der simulierten Lichtverteilung eines „dynamischen Laserspots“ im statischen Betrieb; Funktion 1.

In Abbildung 7.3 wird ein Standardfahrzeug in 30 m entblendet. Der Lichtstrom beträgt 188 lm und die Lichtstärke 59.932 cd.



**Abbildung 7.3:** Darstellung der simulierten Lichtverteilung eines „dynamischen Laserspots“ mit Entblendung eines Standardfahrzeugs in 30 m Entfernung; Funktion 2.

In Abbildung 7.4 ist eine Markierungsfunktion zu sehen. Es wird eine 0,7 m breite und 1,8 m große Person am rechten Straßenrand in 65 m Entfernung markiert. Die maximale Lichtstärke beträgt 62.276 cd und der Lichtstrom umfasst 285 lm.



**Abbildung 7.4:** Darstellung der simulierten Lichtverteilung eines „dynamischen Laserspots“ mit Markierung einer Person in 65 m Entfernung; Funktion 3.

## 7.2 KONVERTER SPOTGRÖÖE

Die Konverter Spotgröße  $r_{kon}$  gibt die leuchtende Fläche auf dem Konverter an. Dieser Parameter beeinflusst die horizontale und vertikale Einblendauflösung  $\alpha_E$ ,  $\beta_E$  und somit auch die Berechnung der Aufenthaltszeit.

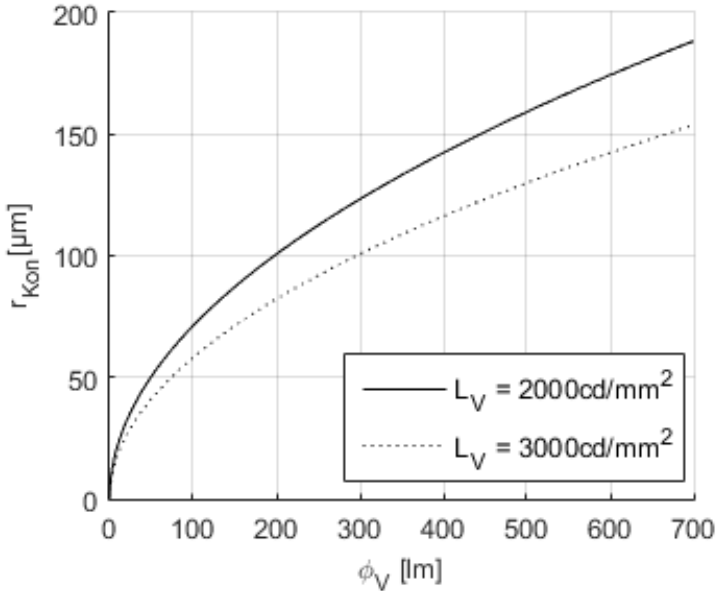
Die im Rahmen des Förderprojekts „iLaS“ zu Verfügung stehenden blauen Laserdioden, haben eine optische Leistung von 2 W bei 25°C. Die optische Effizienz zwischen Laserdioden und Konverter beträgt,

gemäß Kapitel 4.1, rund 96 %. Die Konversionsrate R beträgt, gemäß Kapitel 4.1, 120 lm/W. Der Lichtstrom  $\Phi_v$ , welcher durch eine Laserdiode erzeugt wird, beträgt somit 230,4 lm. Die Leuchtdichte ist auf den, in Kapitel 3.1.1 beschriebenen, Wert von  $L_v = 2000 \text{ cd/mm}^2$  beschränkt. Da die Leuchtdichte limitierend für die Konverter Spotgröße ist, wird ein Multi-Beam Ansatz gewählt. Dabei werden die Laserdioden nicht auf einen Punkt fokussiert, sondern nebeneinander platziert. Zusätzlich ist nur eine Mikrospiegelachse notwendig.

Auf Basis der oben genannten Angaben ist die Spotgröße berechenbar. In dem in dieser Arbeit verwendeten Modell entspricht die Spot-Größe der leuchtenden Fläche auf dem Konverter. Außerdem hat die Intensitätsverteilung des Spots in diesem Modell ein Rechteckprofil, was im Allgemeinen auch als „Top-Profil“ bezeichnet wird. Unter Berücksichtigung dieser Annahmen ergibt sich ein kausaler Zusammenhang zwischen der Konverter Spotgröße und Leuchtdichte für einen Lambert Emitter:

$$r_{Kon} = \sqrt{\frac{\Phi_v}{\pi^2 \cdot L_v}} \quad (7.1)$$

Werden die Werte für den Lichtstrom und die Leuchtdichte von oben eingesetzt, so ergibt sich ein Radius des leuchtenden Bereichs auf einem Konverter  $r_{Kon}$  von 108  $\mu\text{m}$ . In folgender Abbildung 7.5 ist der Zusammenhang zwischen Spotradius  $r_{Kon}$  und Lichtstrom  $\Phi_v$  zu sehen.



**Abbildung 7.5:** Darstellung des Spotradius  $r_{\text{kon}}$  eines Laserdiodenstrahls in Abhängigkeit des von einem Konverter emittierenden Lichtstroms  $\Phi_v$  für zwei Leuchtdichten  $L_v$ .

### 7.3 EINBLENDAUFLÖSUNG

Auf der Grundlage der im vorigen Kapitel berechneten Konverter Spotgröße  $r_{\text{Kon}}$ , kann die erzielbare Einblendauflösung berechnet werden. Hierbei gilt die Prämisse, dass keine Etendue Verluste auftreten dürfen, womit die Formel (2.10) zu berücksichtigen ist. Die Etendue-Gleichung für einen Kreis basiert auf der im Kapitel 2.1 hergeleiteten Formel (2.9). Es gilt des Weiteren, dass die Etendue

senkrecht zur Austrittsfläche berechnet wird. Somit ist  $\theta_{Ga} = \theta_{Gb} = 0^\circ$ . Außerdem gilt für einen rotationssymmetrischen Laserspot auf dem Konverter:  $l_a = l_b = r_{Kon}$ . Die Winkel  $\alpha_{Ga}$  und  $\alpha_{Gb}$  betragen  $90^\circ$ , da es sich um einen Lambert Emitter handelt. Der Brechungsindex wird auf den Wert  $n_B = 1$  gesetzt. Werden diese Werte in Gleichung (2.9) eingesetzt, so berechnet sich die Etendue des leuchtenden Bereichs auf dem Konverter  $G_{Kon}$  gemäß Formel (7.2) zu:

$$G_{Kon} = \pi \cdot r_{Kon}^2 \quad (7.2)$$

Die Etendue einer rotationssymmetrischen Optik  $G_{Optik}$  berechnet sich gemäß Gleichung (7.3):

$$G_{Optik} = \pi \cdot r_{Optik} \sin(\alpha_{Ga}) \cdot r_{Optik} \sin(\alpha_{Gb}) \quad (7.3)$$

Die Winkel  $\alpha_{Ga}$  und  $\alpha_{Gb}$  entsprechen hierbei jeweils dem halben Winkel der Einblendauflösung  $\alpha_E$ , beziehungsweise  $\beta_E$ , wobei auch gilt, dass  $\beta_E = \alpha_E$  ist. Somit ergibt sich schlussfolgernd die Gleichung (7.4).

$$G_{Optic} = \pi \cdot r_{Optik}^2 \sin^2\left(\frac{\alpha_E}{2}\right) \quad (7.4)$$

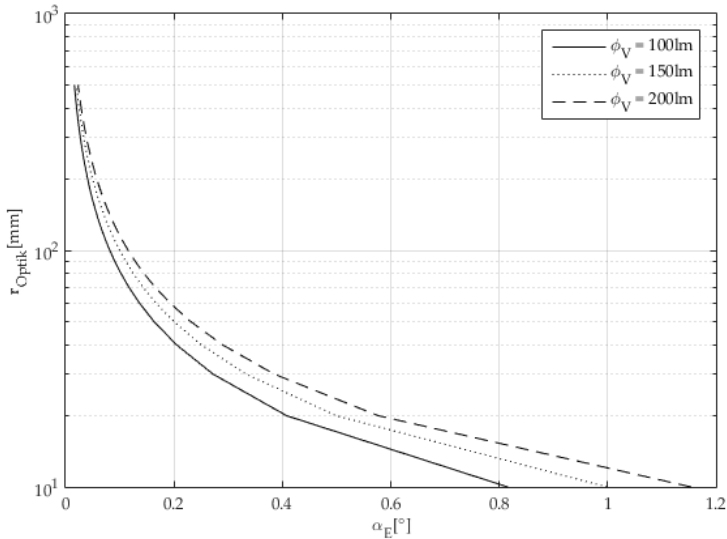
Zur Berechnung der Einblendauflösung unter Berücksichtigung der Etendue lässt sich gemäß Formel (2.10) folgender Zusammenhang aufstellen:

$$\begin{aligned} \pi \cdot r_{Kon}^2 &\leq \pi \cdot r_{Optik}^2 \sin^2\left(\frac{\alpha_E}{2}\right) \\ \alpha_E &\geq 2 \cdot \arcsin \sqrt{\frac{r_{Kon}^2}{r_{Optik}^2}} \end{aligned} \quad (7.5)$$



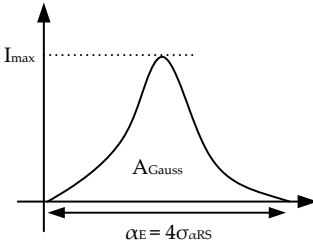
Daraus ergibt sich für  $r_{\text{Kon}} = 108 \mu\text{m}$  und  $r_{\text{Optik}} = 30 \text{ mm}$  eine horizontale und vertikale Einblendauflösung von mindestens  $\alpha_E = \beta_E = 0,41^\circ$ .

Es ist somit bei einer maximalen Linsengröße von  $r=30 \text{ mm}$  und einem Lichtstrom von  $230,4 \text{ lm}$  eine minimale Einblendauflösung von  $0,41^\circ$  erzielbar. Demnach ist die gewünschte Einblendauflösung von  $0,1^\circ$  nicht umsetzbar. Ein größerer Linsendurchmesser kann die Einblendauflösung ebenso verbessern wie ein geringerer Lichtstrom. In Abbildung 7.6 sind für verschiedene Linsengrößen und Lichtströme die daraus resultierende Einblendauflösung ablesbar.

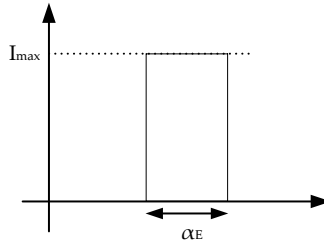


**Abbildung 7.6:** Darstellung der Einblendauflösung  $\alpha_E$  in Abhängigkeit vom Linsenradius  $r_{\text{Optik}}$  und dem Lichtstrom  $\Phi_V$ .

Soll das in diesem Modell verwendete Top- in ein Gaußprofil umgerechnet werden, so vergrößert sich die Einblendauflösung wie aus Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8 ersichtlich wird.



**Abbildung 7.7:** Skizze zur Darstellung der Definition der Einblendauflösung  $\alpha_E$  eines Gauß-Profiles.



**Abbildung 7.8:** Skizze zur Darstellung der Definition der Einblendauflösung  $\alpha_E$  eines Top-Profiles.

Für die Berechnung wird das Integral eines Gaußprofils betrachtet. Die Fläche  $A_{Gauss}$  berechnet sich gemäß folgender Gleichung (7.6):

$$A_{Gauss} = \int_{-\infty}^{\infty} I_{max} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_{RS} - \mu_{\alpha RS}}{\sigma_{\alpha RS}} \right)^2} d\alpha_{RS} = I_{max} \cdot \sigma_{\alpha RS} \sqrt{2\pi} \quad (7.6)$$

Die Fläche  $A_{Top}$  des Topprofils berechnet sich gemäß der nachfolgenden Gleichung (7.7):

$$A_{Top} = I_{max} \cdot \alpha_E \quad (7.7)$$

Werden beide Flächen gleichgesetzt, so ergibt sich die Einblendauflösung auf Basis der Varianz  $\sigma_{\alpha RS}$  gemäß Gleichung (7.8).

$$\alpha_E = \sigma_{\alpha RS} \sqrt{2\pi} \quad (7.8)$$

Der Wert für  $4\sigma_{\alpha RS}$  ergibt sich dann zu:

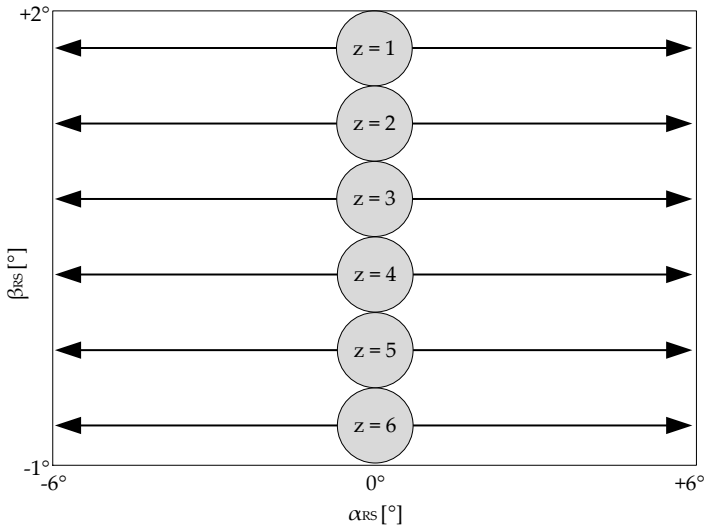
$$4\sigma_{\alpha RS} = 1,6 \cdot \alpha_E \quad (7.9)$$

Der Faktor zwischen der Einblendauflösung eines Top- im Vergleich zu einem Gaußprofil beträgt also 1,6.

### 7.4 MIKROSPIEGELANSTEUERUNG

Die Betriebsart des Mikrospiegels muss so gewählt werden, dass für die blendfreie Fernlichtfunktion, sowie das Reichweiten- und Markierungslicht, ein hoher Nutzungsgrad  $K_{sca}$  erzielbar ist. Ein quasistatischer Betrieb wird den Anforderungen einer variablen Lichtverteilung gerecht. Des Weiteren wird aufgrund der Leuchtdichtelimitierung der in Kapitel 7.2 beschriebene Multi-Beam Ansatz verwendet.

Im Rahmen des „iLaS“ Förderprojekts wurde eine intelligente zeilenweise Anordnung der Laserspots entworfen, mit der eine synthetische zweidimensionale Umsetzung mit einem eindimensionalen quasistatischen Mikrospiegel realisierbar ist [GUT15] [PET15] [REI14], wodurch die Leuchtdichtebeschränkung umgangen werden kann. In Abbildung 7.9 ist die Anordnung der Laserdioden zu sehen.



**Abbildung 7.9:** Übersichtsbild zur Visualisierung der Anordnung der Laserdioden bei einem eindimensionalen Mikrospiegelsystem.

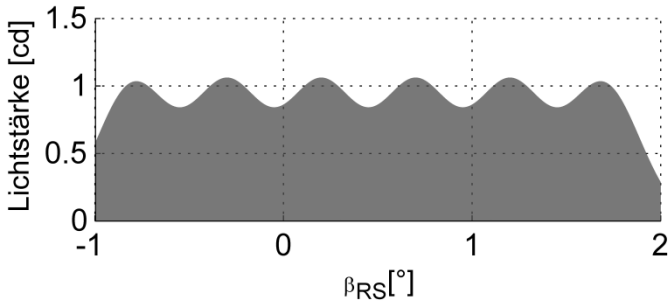
Für den quasistatischen Betrieb wird ein elektromagnetischer Antrieb verwendet. Auf der Rückseite oder im Rahmen des Spiegels ist in dieser Antriebsmethode ein elektrischer Leiter befestigt durch den Strom fließt. Unterhalb des Spiegels befindet sich ein Permanentmagnet womit der Leiter, beziehungsweise der Spiegel, der Lorenzkraft ausgesetzt ist. Die Mikrospiegelansteuerung wird bei der Berechnung und Validierung der Aufenthaltszeit in Kapitel 7.7 berücksichtigt.

## 7.5 HOMOGENITÄTSBETRACHTUNG

Es stehen, gemäß Kapitel 7.1, sechs Laserspots zur Verfügung. Diese sind gleichmäßig vertikal verteilt und haben die gleiche horizontale und vertikale Einblendauflösung.

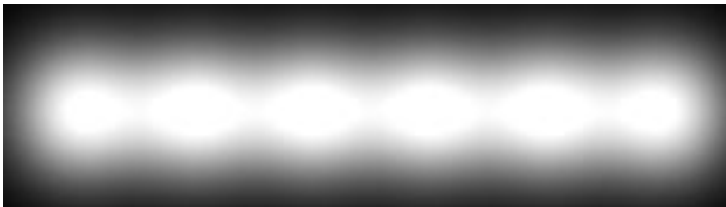
In dieser Arbeit gilt eine Lichtverteilung als homogen, wenn die Differenz zwischen den Intensitätsspitzen und den Senken nicht mehr als 8 % beträgt. Dies beruht auf der Arbeit von Goldstein der diesen Wert als Differenzwert einer Wahrnehmungsschwelle für Licht ermittelte [GOL11]. Die Laserspots sind somit entsprechend zu überlappen, um diesen Wert nicht zu überschreiten. Die Homogenitätsbedingung wird eingehalten, wenn  $\sigma_{\alpha RS} = \sigma_{\beta RS} = 0,19^\circ$  beziehungsweise für  $4\sigma_{\alpha RS} = 4\sigma_{\beta RS} = 0,76^\circ$  gilt. Der Laserspot ist somit größer als die in Kapitel 7.3 ermittelte notwendige Einblendauflösung. Damit wird sichergestellt, dass keine Etendueverluste auftreten.

Die resultierende Überlappung kann Abbildung 7.10 entnommen werden. Die Halbwertsbreite des Gaußprofils der ersten Zeile liegt bei  $-0,8^\circ$  und der sechsten Zeile bei  $1,67^\circ$ . Die Laserspots sind gleich verteilt.



**Abbildung 7.10:** Darstellung des normalisierten, idealisierten vertikalen Lichtstärkeprofils.

Eine alternative simulierte Darstellungsform ist in Abbildung 7.11 zu sehen. Hierbei handelt es sich um eine lineare Graustufendarstellung.

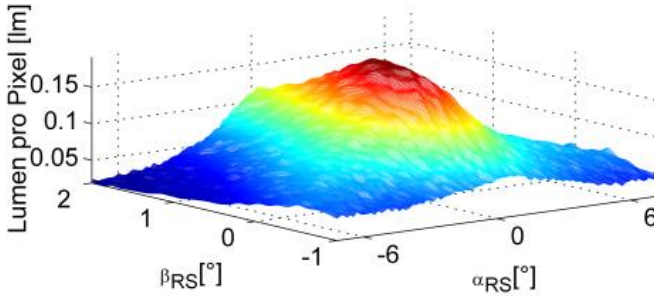


**Abbildung 7.11:** Simulierte Graustufendarstellung der überlagerten Laserspots in vertikaler Richtung.

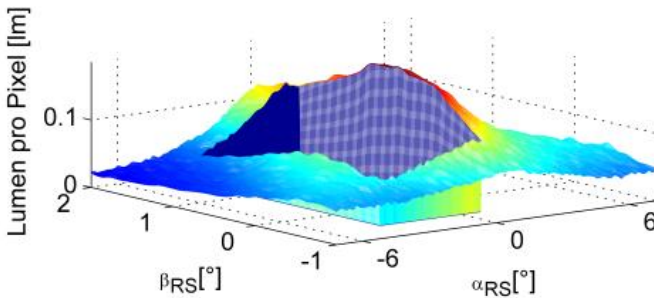
## 7.6 LICHTSTROMMATRIX

Auf Basis der in Kapitel 7.1 hergeleiteten Lichtverteilungen wird mit Hilfe der Raumwinkel eine Lichtstrommatrix gemäß den Gleichun-

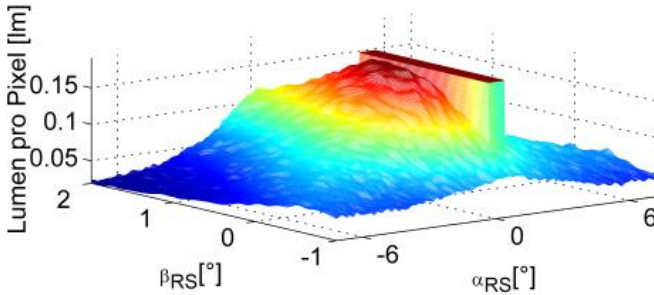
gen aus Kapitel 4.2 berechnet. In den Abbildungen 7.12, 7.13 und 7.14 sind diese Lichtstrommatrizen dargestellt.



**Abbildung 7.12:** Darstellung der simulierten Lichtstrommatrix des dynamischen Laserspots; Funktion 1.



**Abbildung 7.13:** Darstellung der simulierten Lichtstrommatrix des blendfreien Fernlichts; Funktion 2.



**Abbildung 7.14:** Darstellung der simulierten Lichtstrommatrix des Markierungslichts; Funktion 3.

Die horizontale  $\alpha_{\text{Res}}$  und vertikale  $\beta_{\text{Res}}$  Diskretisierungsauflösung beträgt  $0,1^\circ$ . Bei einem horizontalen Öffnungswinkel  $\alpha_d$  von  $12^\circ$  ist  $n = 120$  und bei einem vertikalen Öffnungswinkel von  $\beta_d = 3^\circ$  ist  $m = 30$ . Die Lichtstrommatrix  $\Phi$  ist gemäß Gleichung (7.10) wie folgt definiert:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \dots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{m1} & \Phi_{m2} & \dots & \Phi_{mn} \end{pmatrix} \quad (7.10)$$

## 7.7 AUFENTHALTSZEITMATRIX

Um die benötigten optischen Leistungen zu berechnen, ist zunächst die Aufenthaltszeitmatrix zu bestimmen. Durch die eindimensionale Mikrospiegelansteuerung muss in dem hier verwendeten Modell der horizontale Aufenthaltszeitvektor  $t_{\text{auf\_hor}}$  bestimmt werden. Es



gilt des Weiteren, dass die vertikale Lichtstärkeverteilung, gemäß Kapitel 7.5 als homogen angenommen wird.

Zur Bestimmung des horizontalen Aufenthaltszeitvektors  $t_{\text{auf\_hor}}$  muss zunächst aus der Lichtstrommatrix  $\Phi$  ein Vektor  $\varphi_{\text{max}}$  bestimmt werden, der für jede Spalte der Lichtstrommatrix den maximalen Wert enthält. Er berechnet sich nach Gleichung (7.11) mit  $m = 30$  und  $n = 120$  wie folgt:

$$\varphi_{\text{max}} = \left[ \max \begin{bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{2,1} \\ \dots \\ \phi_{m,1} \end{bmatrix}; \max \begin{bmatrix} \phi_{1,2} \\ \phi_{2,2} \\ \dots \\ \phi_{m,2} \end{bmatrix}; \dots; \max \begin{bmatrix} \phi_{1,n} \\ \phi_{2,n} \\ \dots \\ \phi_{m,n} \end{bmatrix} \right] \quad (7.11)$$

Anschließend sind, gemäß des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modells, die Werte des Vektors  $\varphi_{\text{max}}$  an eine Gaußverteilung anzupassen. Die daraus resultierenden Werte werden im Vektor  $p_{\text{Fit}}$  aus Gleichung (7.12) abgespeichert.

$$p_{\text{Fit}} = [p_{\text{Fit } 1}; p_{\text{Fit } 2}; \dots; p_{\text{Fit } n}] \quad (7.12)$$

Der Vektor wird gemäß Gleichung (7.13) normalisiert, indem jedes Element  $p_{\text{Fit } j}$  mit  $j = 1, \dots, n$  des Vektors durch die Summe aller Elemente geteilt wird.

$$p_{\text{Fit } j} = \frac{p_{\text{Fit } j}}{\sum_{j=1}^n [p_{\text{Fit } j}]} \quad (7.13)$$

Um die horizontale Aufenthaltszeit zu erhalten, muss der normalisierte Vektor mit dem Faktor  $T_{\text{frame}}/2$  multipliziert werden. Die Zeit für den Aufbau eines Frames  $T_{\text{frame}}$  berechnet sich hierbei aus der Bildwiederholfrequenz  $f_{\text{frame}}$ , welche gemäß Kapitel 6.6, 120 Hz beträgt. Somit ergibt sich  $T_{\text{frame}}$  gemäß Gleichung (7.14) zu:

$$T_{frame} = \frac{1}{120 \frac{1}{s}} = 8, \overline{33} \text{ ms} \quad (7.14)$$

Für die Berechnung der Aufenthaltszeit wird nur ein Durchgang berücksichtigt. Deswegen wird die Framerate durch den Faktor zwei dividiert. Der daraus resultierende Aufenthaltszeitvektor  $t_{auf\_hor}$  ist der Gleichung (7.15) zu entnehmen.

$$t_{auf\_hor} = \frac{T_{frame}}{2} [p_{Fit\ 1}; p_{Fit\ 2}; \dots p_{Fit\ n}] \quad (7.15)$$

Zur Überprüfung der durchgeführten Rechenoperation, muss gemäß Gleichung (7.16) die Summe aller Elemente des Aufenthaltszeitvektors  $t_{auf\_hor}$  dem Wert  $T_{frame}/2$  entsprechen.

$$\frac{T_{frame}}{2} = \sum_{j=1}^n t_{auf\_hor\ j} \quad (7.16)$$

Zur Validierung der maximalen Beschleunigung des Mikrospiegels ist auf Basis des Aufenthaltszeitvektors und der Beschleunigung die Geschwindigkeit zu bestimmen. Es muss die Geschwindigkeit, ausgehend von einem Pixel  $a_j$ , durch die Mikroskopbeschleunigung so angepasst werden, dass die notwendige Geschwindigkeit in Pixel  $a_{j+1}$  erreichbar ist.

Für die Berechnung der Geschwindigkeit in einem Pixel muss die Beschleunigung in jedem Pixel untersucht werden. Es wird ein quasistatischer Betrieb angestrebt, wobei in einer realen Betrachtung die maximale Beschleunigung innerhalb eines Pixels durch die Spiegelparameter beschränkt ist. Außerdem gilt in dem hier verwendeten Modell, dass die Beschleunigung innerhalb eines Pixels als konstant anzunehmen ist.

In den Berechnungen ist zu berücksichtigen, dass die Auslenkung des Mikrospiegels  $\alpha_{MEMS}$  prinzipbedingt nur halb so groß ist wie der optische Öffnungswinkel. Daraus ergibt sich für die Auslenkung des Mikrospiegels  $\alpha_{MEMS}$  der Zusammenhang aus Gleichung (7.17).

$$\alpha_{MEMS} = \frac{\alpha_{RS}}{2} \quad (7.17)$$

Da die Anzahl an Scanschritten von  $n = 120$  gleich bleibt, ändert sich die Diskretisierungsauflösung  $\alpha_{Res}$  von  $0,1^\circ$  auf  $0,05^\circ$ .

Die Geschwindigkeit des Mikrospiegels  $\dot{\alpha}_{MEMS\ j+1}$ , welche am Ende eines Pixels  $a_{j+1}$  zu erzielen ist, berechnet sich gemäß Gleichung (7.18) aus der konstanten Winkelbeschleunigung innerhalb des Pixels, multipliziert mit der verfügbaren Aufenthaltszeit  $t_{auf\_hor}$  addiert mit der Winkelgeschwindigkeit des Pixels  $a_j$ .

$$\dot{\alpha}_{MEMS\ j+1} = \ddot{\alpha}_{MEMS\ j+1} \cdot t_{hor\_auf\ j+1} + \dot{\alpha}_{MEMS\ j} \quad (7.18)$$

mit  $j = 1, \dots, n$ .

Um zu überprüfen, ob die Winkelbeschleunigung  $\ddot{\alpha}_{MEMS}$  realisierbar ist, wird diese mit der aus den Mikrospiegelparametern berechneten realen Mikrospiegelbeschleunigung  $\ddot{\alpha}_{MEMS\ Real}$  verglichen. Es muss die Ungleichung (7.19) erfüllt sein.

$$|\ddot{\alpha}_{MEMS}| \leq |\ddot{\alpha}_{MEMS\ Real}| \quad (7.19)$$

Die reale Beschleunigung des Mikrospiegels  $\ddot{\alpha}_{MEMS\ Real\ j}$  in einem Pixel  $a_j$  wird gemäß Alliger [ALL15] über den Drehimpulssatz berechnet, welcher besagt, dass das Trägheitsmoment  $J$  multipliziert

mit der Mikrospiegelbeschleunigung  $\ddot{\alpha}_{MEMS\ Real}$  gleich der Summe der Drehmomente  $M_n$  ist.

$$J \cdot \ddot{\alpha}_{MEMS\ Real} = \sum_n M_n \quad (7.20)$$

Es gibt hierbei drei Arten von Drehmomenten, die auf den Mikrospiegel einwirken. Das erste Drehmoment ist das sogenannte Direktionsmoment, welches abhängig von der Federrückstellkraft und von der Auslenkung des Spiegels ist. Das zweite Drehmoment ist durch die Dämpfung in einem nicht luftleeren Raum bedingt. Das dritte Drehmoment wird durch die Lorenzkraft verursacht.

Durch Umstellen der Gleichung (7.20) und unter der Voraussetzung, dass der Mikrospiegel sich um eine feste Achse, die Torsionsbalken dreht, kann durch einsetzen der Drehmomente die Winkelbeschleunigung gemäß Gleichung (7.21) aus der Differentialgleichung berechnet werden:

$$\ddot{\alpha}_{MEMS\ Real} = \frac{-C_1 \cdot \dot{\alpha}_{MEMS\ Real} - C_2 \cdot \alpha_{MEMS\ Real} + M_{Aktor}(\alpha_{MEMS\ Real})}{J} \quad (7.21)$$

Der Winkel  $\alpha_{MEMS\ Real}$  gibt hierbei die Spiegelauslenkung, gemessen von der Ruhelage des Mikrospiegels an.

Das Trägheitsmoment  $J$  des Spiegels wird für einen Quader, mit den Längenkanten  $a_{MEMS}$  und  $b_{MEMS}$ , gemäß der Gleichung (7.22) berechnet. Die Variable  $m_{MEMS}$  steht hierbei für die Masse des Mikrospiegels. Das durch den Leitungsrahmen verursachte Trägheitsmoment wird vernachlässigt.

$$J = \frac{m_{MEMS}(a_{MEMS}^2 + b_{MEMS}^2)}{12} \quad (7.22)$$

Zur Berechnung von  $M_{Aktor}$  gilt in dem hier verwendeten Modell, dass die Flussdichte des Magnetfeldes über die ganze Fläche des Mikrospiegelantriebes konstant ist. Somit berechnet sich gemäß Gleichung (7.23)  $M_{Aktor}$  aus der Lorenzkraft multipliziert mit dem Kosinus korrigiertem Abstand des stromdurchflossenen Leiters zur Rotationsachse.

$$M_{Aktor}(\alpha_{MEMS Real}) = 2 \cdot F_{Aktor}(\alpha_{MEMS Real}) \cdot \frac{l_2}{2} \cdot \cos \alpha_{MEMS Real} \quad (7.23)$$

Die Lorenzkraft  $F_{Aktor}$  ist gemäß Gleichung (7.24) aus dem Produkt der Leitungslänge  $l_1$ , dem B-Feld und dem Strom  $I_{MEMS}$  berechenbar. Der Winkel zwischen dem Stromdurchflossenen Leiter und dem B-Feld beträgt unabhängig von der Auslenkung  $90^\circ$ .

$$F_{Aktor} = I_{MEMS} \cdot l_1 \cdot B \quad (7.24)$$

Die Leistungslänge  $l_1$  ist parallel zur Mikrospiegelachse. Sie ist größer als die Höhe des Mikrospiegels  $c_{MEMS}$ , da sich der Leiter auf einem Rahmen außerhalb des aktiven Mikrospiegels befindet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Leitungslänge  $l_2$  keine Auswirkung hat, da diese Parallel zum B-Feld positioniert ist. Die Stromstärke  $I_{MEMS}$  lässt sich aus dem Ohm'schen Gesetz berechnen.

$$I_{MEMS} = \frac{U}{\rho \frac{2 \cdot (l_1 + l_2) \cdot n_{Leiter}}{A_{Leiter}}} \quad (7.25)$$

Der Parameter  $U$  steht hierbei für die Spannung und  $\rho$  für den spezifischen Widerstand. Der Parameter  $A_{Leiter}$  gibt den Leitungs-

querschnitt an. Die Leitungslänge ergibt sich aus  $l_1$  und  $l_2$  sowie durch Multiplikation mit der Anzahl der Windungen  $n_{Leiter}$ .

Durch einsetzen der Gleichung (7.25) in Gleichung (7.24) und anschließendes einfügen in Gleichung (7.23) ergibt sich die Gleichung (7.26):

$$M_{Aktor}(\alpha_{MEMS\ Real}) = \frac{U \cdot A_{Leiter}}{\rho(2 \cdot (l_1 + l_2) \cdot n_{Leiter})} \cdot l_1 \cdot B \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_{MEMS\ Real} \quad (7.26)$$

Nach Berechnung des Drehmoments, welches auf den Mikrospiegel einwirkt, sind noch zwei weitere Drehmomente zu berechnen. Da der Spiegel vakuumgekapselt ist, kann die Dämpfungskonstante  $C_2$  auf den Wert Null gesetzt werden.

Der Parameter  $C_1$  gibt die Federrückstellkraft an, die sich aus der doppelten Federkonstanten  $k_{Tor}$  ergibt, da zwei identische Torsionsbalken den Spiegel halten.

$$C_1 = 2 \cdot k_{Tor} \quad (7.27)$$

Die Federkonstante  $k_{Tor}$  kann aus dem Schubmodul für Silizium und dem Flächenträgheitsmoment  $I_{Tor}$  des Torsionsbalken sowie dessen Länge  $L_{Tor}$  gemäß Gleichung (7.28) berechnet werden.

$$k_{Tor} = \frac{G_{silizium} I_{Tor}}{L_{Tor}} \quad (7.28)$$

In dem hier verwendeten Modell eines Mikrospiegels ist der Torsionsbalken rund. Das Flächenträgheitsmoment  $I_{Tor}$  berechnet sich für einen runden Querschnitt wie folgt:

$$I_{Tor} = \frac{(\pi r_{Tor}^4)}{2} \quad (7.29)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (7.29) in Gleichung (7.28) und dem anschließenden Einsetzen in Gleichung (7.27) ergibt sich für  $C_1$  die Gleichung (7.30):

$$C_1 = 2 \cdot \frac{G_{Silizium} \frac{(\pi r_{Tor}^4)}{2}}{L_{Tor}} \quad (7.30)$$

Durch Ersetzen von  $M_{Aktor}$  aus Gleichung (7.23) und  $J$  aus Gleichung (7.22) ergibt sich die auf den Mikrospiegelparameter basierende Winkelbeschleunigung gemäß Gleichung (7.31).

$$\ddot{\alpha}_{MEMS Real} = \quad (7.31)$$

$$2 \cdot \frac{G_{Silizium} \frac{(\pi r_{Tor}^4)}{2}}{L_{Tor}} \cdot \dot{\alpha}_{MEMS Real} + \frac{U}{\rho \frac{2 \cdot (l_1 + l_2) \cdot n_{Leiter}}{A_{Leiter}}} \cdot l_1 \cdot B \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_{MEMS Real}$$


---

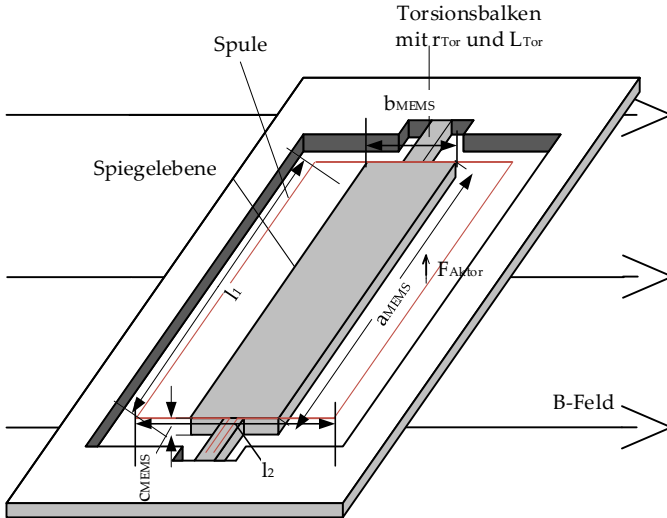

$$\frac{m_{MEMS} (a_{MEMS}^2 + b_{MEMS}^2)}{12}$$

Für die Berechnung der Aufenthaltszeiten mit dem in dieser Arbeit entworfenem Modell, wurden die in der Tabelle 7.1 und Abbildung 7.15 dokumentierten Mikrospiegelparameter verwendet. Durch das Ersetzen der Tabellenwerte mit projektspezifischen Parametern können sich die entsprechenden Aufenthaltszeiten ändern.

**Tabelle 7.1:** Exemplarische Mikrospiegelparameter zur Berechnung der Mikrospiegelbeschleunigung.

Zeichen	Erklärung	Wert
U	Angelegte Spannung am stromdurchflossenen Leiter	3,4mV
$\rho$	Spezifischer Widerstand des Leiters für Kupfer	$1,72 \cdot 10^{-2} \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$
$l_1$	Leitungslänge parallel zur Mikrospiegelachse	5 mm
$l_2$	Leitungslänge senkrecht zur Mikrospiegelachse	10 mm
$A_{\text{Leiter}}$	Querschnittsfläche des Leiters	$2,54 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2$
B	Erzeugte magnetische Flussdichte	0,5 T
$a_{\text{MEMS}}$	Höhe des Mikrospiegels	0,1 mm
$b_{\text{MEMS}}$	Breite des Mikrospiegels	1,5 mm
$c_{\text{MEMS}}$	Länge des Mikrospiegels	5 mm
$m_{\text{MEMS}}$	Masse des Mikrospiegels	$1,752 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$
$r_{\text{Tor}}$	Radius des Torsionsbalkens	62,5 $\mu\text{m}$
$L_{\text{Tor}}$	Länge des Torsionsbalkens	593 $\mu\text{m}$
$G_{\text{Si}}$	Schubmodul für Silizium	79,9 GPa
$n_{\text{Leiter}}$	Anzahl der Windungen	20





**Abbildung 7.15:** Darstellung des Mikrospiegels.

## 7.8 LEISTUNGSBERECHNUNG

Ziel der Leistungsberechnung ist es abzu prüfen, ob die verfügbare optische Leistung einer Laserdiode ausreichend ist, um die gewünschte Lichtverteilung zu erzeugen. Es werden mehrere Modulationsarten untersucht und der jeweilige Nutzungsgrad  $K_{\text{Scal}}$  sowie die Lichtverteilungen bestimmt. In diesem Kapitel ist die maximale Leistung  $P_{\text{max}}$ , die mittlere Leistung  $P_{\text{mean}}$  und die elektrische Leistung  $P_{\text{el}}$  zu berechnen. Aufgrund der eindimensionalen Betriebsart ist zwischen der globalen maximalen optischen Leistung  $P_{\text{max}}$  „aller Zeilen“ und der lokalen maximalen optischen

Leistung „einer Zeile“ zu unterscheiden. Dies gilt ebenso für die mittlere Leistung  $P_{\text{mean}}$ . Die Leistungen der einzelnen Zeilen werden gemäß Abbildung 7.9 mit einem zusätzlichen Index  $z$  versehen. Die maximale und mittlere optische Leistung der Zeile  $z$  beträgt  $P_{\text{max } z}$  beziehungsweise  $P_{\text{mean } z}$  mit  $z = 1, \dots, 6$ . Der lokale Nutzungsgrad für jede Zeile  $K_{\text{sca } z}$  folgt der obigen Definition. Er berechnet sich für die globale als auch lokale Betrachtung aus dem Verhältnis von  $P_{\text{mean}}$  zu  $P_{\text{max}}$ .

In dem hier verwendeten Modell werden jeder Zeile  $z$  fünf diskretisierte Pixel der Lichtstrommatrix zugeordnet. Die Zeile  $z$  beinhaltet die Zeilen  $i$  der Lichtstrommatrix von  $i = 5(z-1)+1, \dots, 5(z-1)+5$  mit  $z = 1, \dots, 6$ .

Für die Berechnung der optischen Leistung wird in der Lichtstrommatrix der größte Lichtstrom innerhalb einer Zeile  $z$  und einer Spalte  $j$  gesucht und dieser anschließend auf alle weiteren Zeilenelemente  $i$  übertragen, was einer Multiplikation mit dem Faktor fünf entspricht. Die optischen Leistungen werden für jede Zeile  $z$  in einen Vektor  $P_{\text{max}_z}$  der Dimension  $n = 120$  gemäß Gleichung (7.32) geschrieben.

$$P_{\text{max } z,j} = \frac{5}{\eta_{\text{Str}_\text{Sys}} \cdot R} \cdot \left[ \frac{\Phi_{\text{max } z,1}}{t_{\text{aufhor1}}} \quad \frac{\Phi_{\text{max } z,2}}{t_{\text{aufhor2}}} \quad \dots \quad \frac{\Phi_{\text{max } z,n}}{t_{\text{aufhorn}}} \right] \quad (7.32)$$

Die mittlere und maximale Leistung der Zeile  $z$  ergibt sich gemäß Gleichung (7.33) und (7.34).

$$P_{\text{mean } z} = \frac{\sum_{j=1}^n [P_{zj}]}{n} \quad (7.33)$$

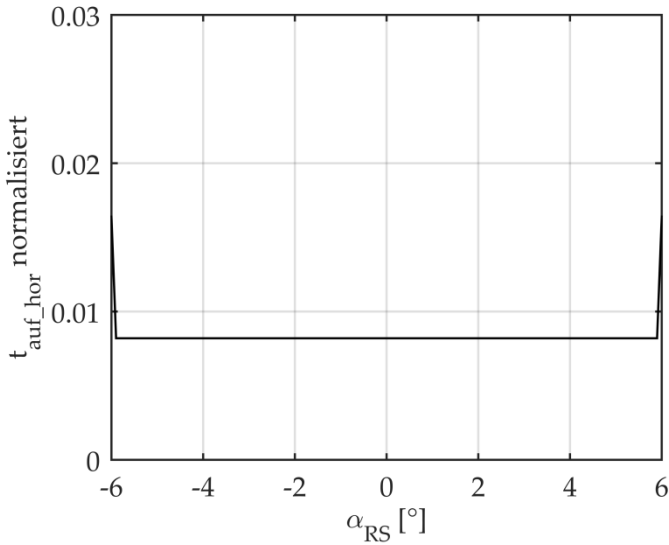
$$P_{\text{max } z} = \max [P_{\text{max } z,j}] \quad (7.34)$$

Mit  $j = 1, \dots, n$ .

Im Folgenden werden drei Modulationsarten untersucht. Im ersten Ansatz erfolgt die Modulation der optischen Leistung. Im zweiten Ansatz wird die Aufenthaltszeit moduliert. Im letzten Ansatz wird sowohl die Laserleistung als auch die Aufenthaltszeit moduliert.

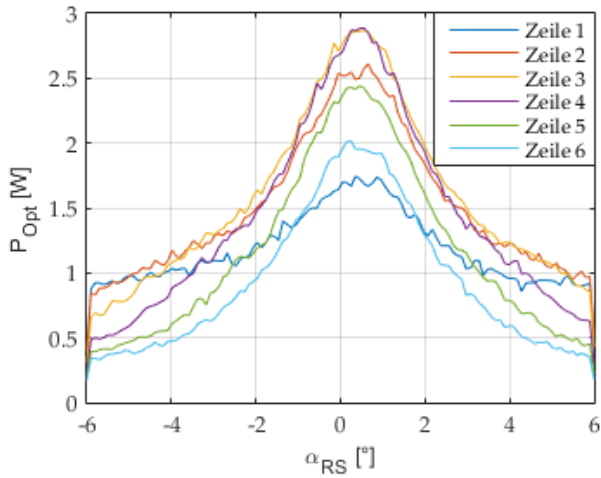
### 7.8.1 LINEARER MIKROSPIEGELBETRIEB

In dieser Modulationsart wird die Lichtverteilung durch die gezielte Steuerung der optischen Leistung erzeugt. Deshalb wird der Mikrospiegel, gemäß Abbildung 7.16, bewegt.

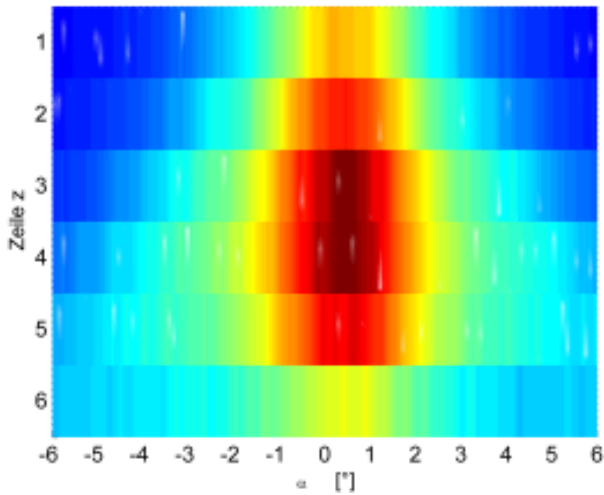


**Abbildung 7.16:** Darstellung der normalisierten Aufenthaltszeit in Abhängigkeit des Auslenkwinkels  $\alpha_{\text{RS}}$ .

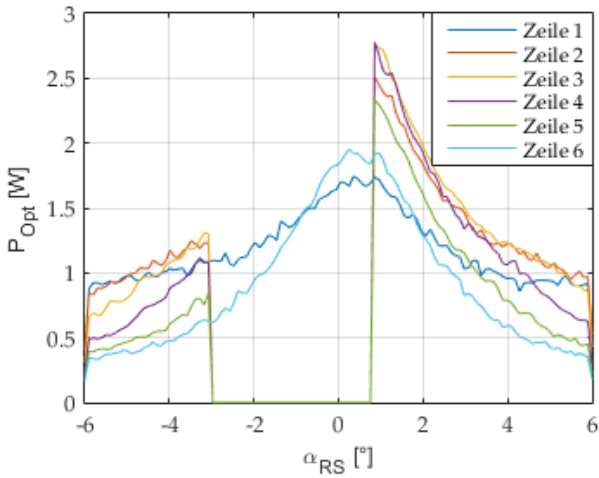
Die optische Leistung jeder Laserdiode für die in Kapitel 7.1 definierten Lichtfunktionen ist in Abbildung 7.17, Abbildung 7.19 und Abbildung 7.21 zu sehen. In Abbildung 7.18, Abbildung 7.20 und Abbildung 7.22 ist die daraus resultierende Lichtverteilung dargestellt. Die rekonstruierte Lichtverteilung hat für die Lichtverteilung 1, den Wert  $\Phi_v = 302 \text{ lm}$ , für die Lichtverteilung 2 ist  $\Phi_v = 206 \text{ lm}$  und für die Lichtverteilung 3 beträgt der Lichtstrom  $\Phi_v = 305 \text{ lm}$ .



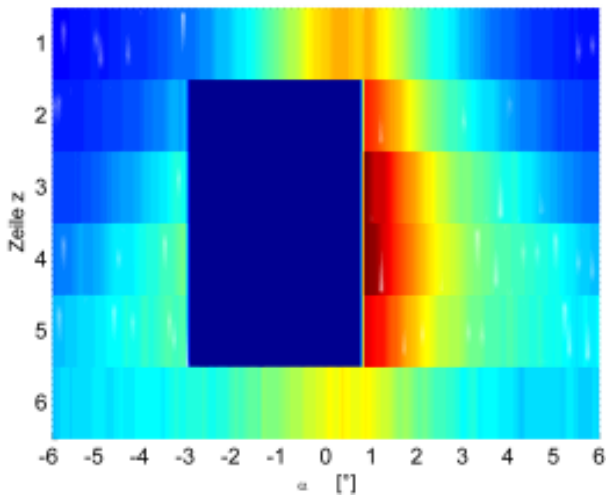
**Abbildung 7.17:** Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 1.



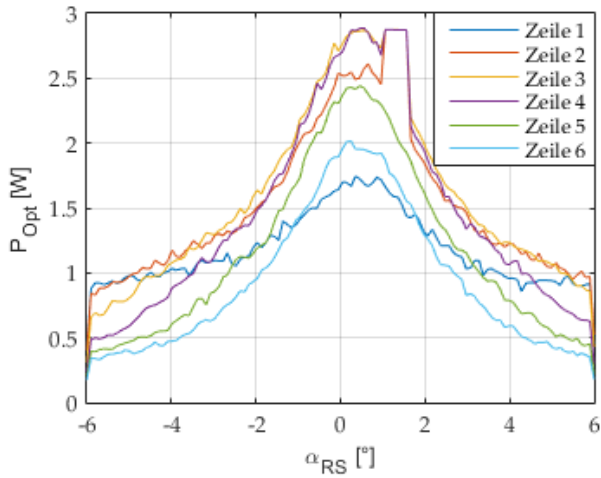
**Abbildung 7.18:** Darstellung der Lichtverteilung 1.



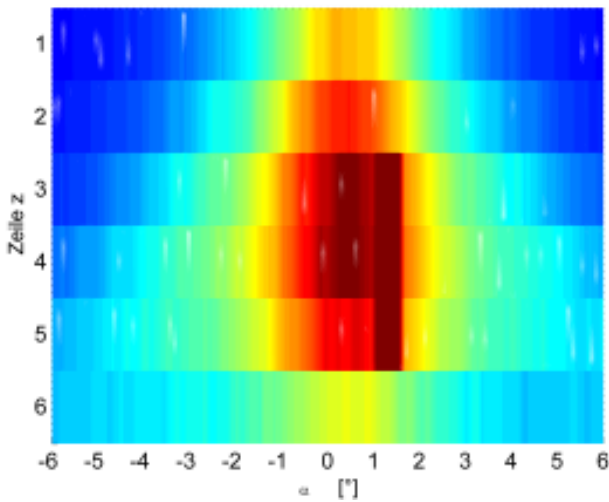
**Abbildung 7.19:** Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 2.



**Abbildung 7.20:** Darstellung der Lichtverteilung 2.



**Abbildung 7.21:** Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 3



**Abbildung 7.22:** Darstellung der Lichtverteilung 3.

In der nachstehenden Tabelle 5.2 sind die lokalen und globalen optischen Leistungen, sowie der Nutzungsgrad dargestellt.

**Tabelle 7.2:** Benötigte optische Leistungen pro Zeile in Abhängigkeit der Lichtfunktion 1 „dynamischer Laserspot“, Lichtfunktion 2 „dynamischer Laserspot mit Entblendung“ und Lichtfunktion 3 „dynamischer Laserspot mit Markierung“.

Parameter	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
$P_{\max}$ (global)	14,57 W	14,08 W	14,84 W
$P_{\max z}$ (lokal)	1: 1,74 W	1: 1,74 W	1: 1,74 W
	2: 2,61 W	2: 2,51 W	2: 2,87 W
	3: 2,87 W	3: 2,76 W	3: 2,87 W
	4: 2,89 W	4: 2,78 W	4: 2,89 W
	5: 2,44 W	5: 2,33 W	5: 2,44 W
	6: 2,01 W	6: 1,95 W	6: 2,01 W
$P_{\text{mean } z}$ (lokal)	1: 1,17 W	1: 1,17 W	1: 1,17 W
	2: 1,50 W	2: 0,89 W	2: 1,53 W
	3: 1,56 W	3: 0,88 W	3: 1,58 W
	4: 1,43 W	4: 0,79 W	4: 1,45 W
	5: 1,15 W	5: 0,62 W	5: 1,15 W
	6: 0,93 W	6: 0,91 W	6: 0,93 W
$P_{\text{mean}}$ (global)	7,74 W	5,27 W	7,81 W
$K_{\text{sca}}$ (global)	0,53	0,37	0,53
$K_{\text{sca\_lokal } z}$ (lokal)	1: 0,67	1: 0,67	1: 0,67
	2: 0,57	2: 0,35	2: 0,53
	3: 0,54	3: 0,32	3: 0,55
	4: 0,49	4: 0,28	4: 0,50
	5: 0,47	5: 0,26	5: 0,47



---

## Leistungsberechnung

---

---

6: 0,46

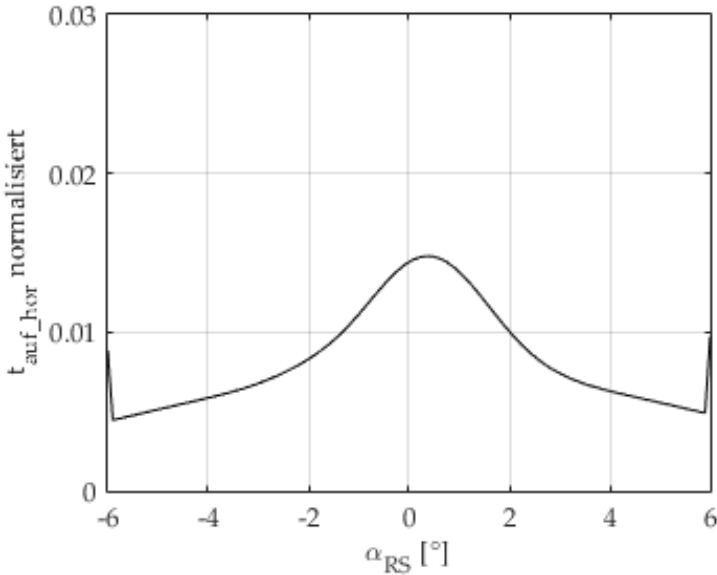
6: 0,47

6: 0,46

---

### 7.8.2 OPTIMIERTER MIKROSPIEGELBETRIEB

Im vorigen Kapitel wurde ersichtlich, dass neben der Aufenthaltszeit auch die Laserleistung zu modulieren ist, um den Nutzungsgrad zu steigern. Dies führt zu einer multiplen Modulation bei der, neben der optischen Leistung jeder Laserdiode, auch die Aufenthaltszeit angepasst wird. Die normalisierte Aufenthaltszeit berechnet sich gemäß Kapitel 7.7 und kann der Abbildung 7.23 entnommen werden. Eine Anpassung der Aufenthaltszeitmatrix in Abhängigkeit der Lichtfunktion wird nicht vorgenommen. In der Tabelle 7.3 können die optischen Leistungen der Laserdioden entnommen werden.



**Abbildung 7.23:** Darstellung der optimierten normalisierten Aufenthaltszeit in Abhängigkeit des Auslenkwinkels  $\alpha_{\text{RS}}$ .

**Tabelle 7.3:** Benötigte optische Leistungen pro Zeile im optimierten Mikrospiegelbetrieb in Abhängigkeit der Lichtfunktion 1 „dynamischer Laserspot“, Lichtfunktion 2 „dynamischer Laserspot mit Entblendung“ und Lichtfunktion 3 „dynamischer Laserspot mit Markierung“.

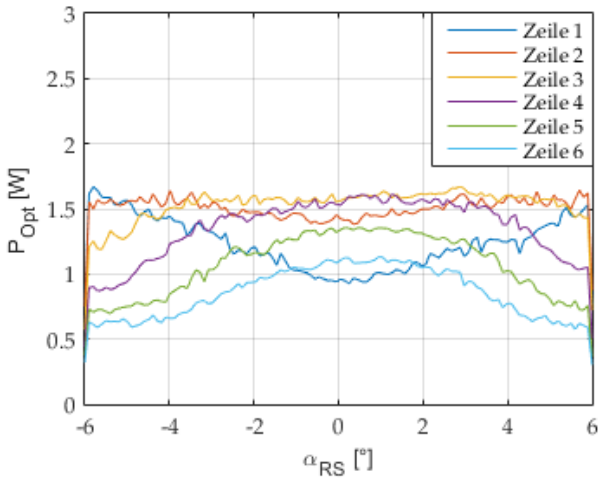
Parameter	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3
$P_{\text{max}}$ (global)	9,08 W	8,84 W	9,92 W
$P_{\text{max z}}$ (lokal)	1: 1,67 W	1: 1,45 W	1: 1,68 W
	2: 1,64 W	2: 1,54 W	2: 1,92 W
	3: 1,67 W	3: 1,59 W	3: 1,92 W
	4: 1,61W	4: 1,53 W	4: 1,92 W

## Leistungsberechnung

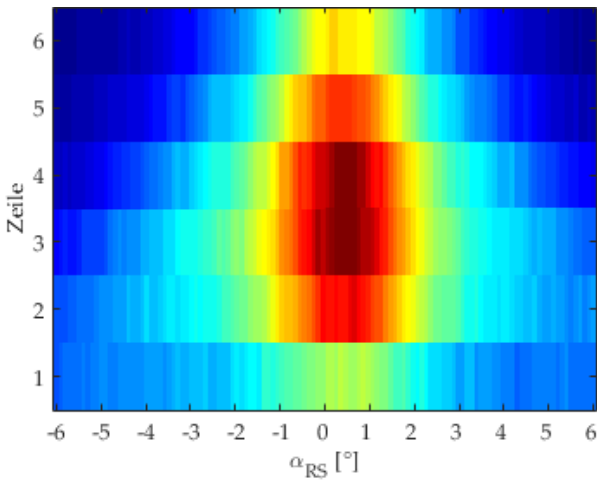
	5: 1,36 W	5: 1,28 W	5: 1,35 W
	6: 1,13 W	6: 1,45 W	6: 1,12 W
$P_{\text{mean } z}$ (lokal)	1: 1,23 W	1: 1,20 W	1: 1,24 W
	2: 1,50 W	2: 0,92 W	2: 1,53 W
	3: 1,52 W	3: 0,91 W	3: 1,54 W
	4: 1,35 W	4: 0,77 W	4: 1,37 W
	5: 1,07 W	5: 0,59 W	5: 1,07 W
	6: 0,85 W	6: 0,85 W	6: 0,85 W
$P_{\text{mean}}$ (global)	7,51 W	5,24 W	7,59 W
$K_{\text{sca}}$ (global)	0,83	0,59	0,77
$K_{\text{sca\_local } z}$ (lokal)	1: 0,74	1: 0,82	1: 0,74
	2: 0,91	2: 0,60	2: 0,79
	3: 0,91	3: 0,57	3: 0,80
	4: 0,84	4: 0,50	4: 0,71
	5: 0,78	5: 0,46	5: 0,79
	6: 0,75	6: 0,58	6: 0,76

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die maximale optische Leistung verringert und der Nutzungsgrad gegenüber dem linearen Mikrospiegelbetrieb gesteigert werden kann.

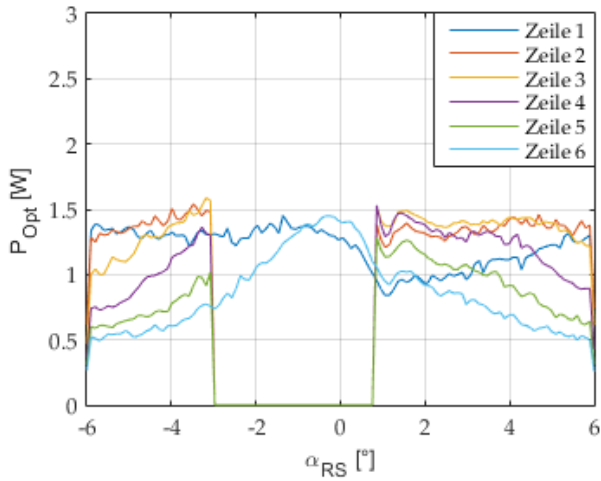
Die optischen Leistungen der Laserdioden, sowie die rekonstruierten Lichtverteilungen, sind in der Abbildung 7.24 bis Abbildung 7.29 zu finden. Der Lichtstrom  $\Phi_v$  für die rekonstruierte Lichtverteilung 1, beträgt 295 lm, für die Lichtverteilung 2, 223 lm und für die Lichtverteilung 3, 298 lm.



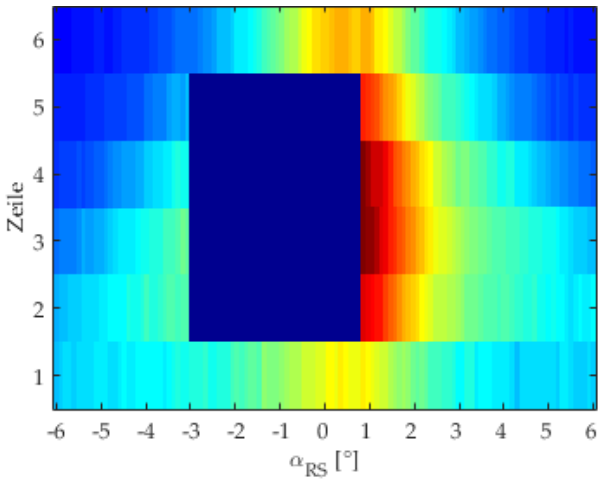
**Abbildung 7.24:** Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 1.



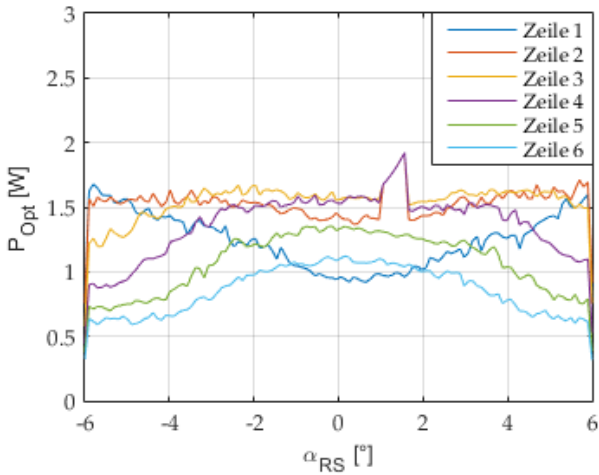
**Abbildung 7.25:** Darstellung der Lichtverteilung 1.



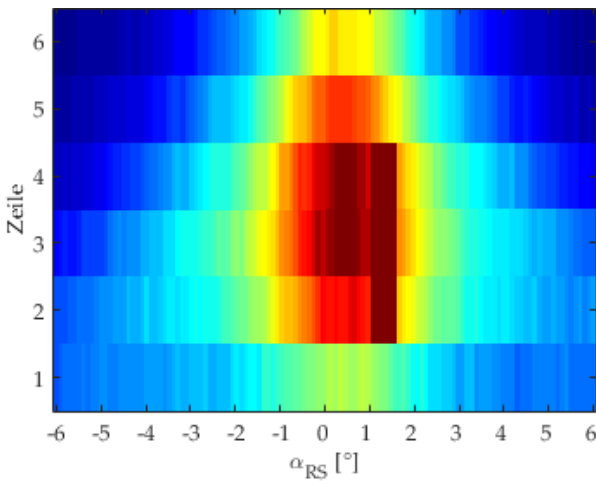
**Abbildung 7.26:** Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 2.



**Abbildung 7.27:** Darstellung der Lichtverteilung 2.



**Abbildung 7.28:** Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 3.



**Abbildung 7.29:** Darstellung der Lichtverteilung 3.

## 7.9 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Konzipierung zeigt, dass die Spotgröße auf dem Konverter  $r_{\text{Kon}}$  durch die Leuchtdichte und den Lichtstrom auf  $r_{\text{Kon}} = 108 \mu\text{m}$  limitiert ist. Unter Berücksichtigung der Etendue, der minimalen Spotgröße auf dem Konverter und der begrenzten Größe der Optik, beträgt die kleinstmögliche Einblendauflösung  $\alpha_E = \beta_E = 0,41^\circ$ . Wenn zusätzlich die Lichtverteilung des Spots als Gaußprofil angenommen wird, verbreitert sich der Spot um den Faktor 1,6. Somit beträgt die horizontale und vertikale Einblendauflösung  $\alpha_E$  und  $\beta_E$ , gemessen an der Breite des Gaußprofils von  $4\sigma_{\text{ARS}}$ ,  $0,65^\circ$ .

Die Homogenitätsbetrachtung ergab für die Einblendauflösung  $\alpha_E = \beta_E$ , gemessen an der Gaußbreite  $4\sigma_{\text{ARS}}$ , einen benötigten Öffnungswinkel von  $0,76^\circ$ . Der Öffnungswinkel liegt oberhalb der minimalen Einblendauflösung wodurch sichergestellt werden kann, dass keine Etendueverluste auftreten.

Aus der nachstehenden Tabelle 7.4, welche die beiden Ansätze gegenüberstellt, wird ersichtlich, dass die maximale optische Leistung in der optimierten Ansteuerung in allen drei Lichtfunktionen um 5 W reduziert werden kann. Durch die optimierte Ansteuerung ist die benötigte optische Leistung einer Laserdiode von 2,89 W auf 1,92 W reduzierbar. Durch die optimierte Mikrospiegelansteuerung kann somit der Nutzungsgrad  $K_{\text{Sca}}$  für die erste Lichtfunktion „dynamischer Laserspot“ um 30 %, der zweiten Lichtfunktion „dynamischer Laserspot mit Entblendung“ um 22 %

und der dritten Lichtfunktion „dynamischer Laserspot mit Markierungslicht“ um 24 % gesteigert werden.

**Tabelle 7.4:** Gegenüberstellung der benötigten optischen Leistungen und des Nutzungsgrads für die Lichtfunktion 1 „dynamischer Laserspot“, Lichtfunktion 2 „dynamischer Laserspot mit Entblendung“ und Lichtfunktion 3 „dynamischer Laserspot mit Markierung“.

<b>Parameter</b>	<b>Funktion 1</b>	<b>Funktion 2</b>	<b>Funktion 3</b>
Linear $P_{\max}$ (global)	14,57 W	14,08 W	14,84 W
Optimiert $P_{\max}$ (global)	9,08 W	8,84 W	9,92 W
Linear $P_{\max z}$ (lokal)	2,89 W	2,78 W	2,89 W
Optimiert $P_{\max z}$ (lokal)	1,67 W	1,59 W	1,92 W
Linear $K_{\text{sca}}$ (global)	0,53	0,37	0,53
Optimiert $K_{\text{sca}}$ (global)	0,83	0,59	0,77



---

## Kapitel 8

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 8.1 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Dissertation fokussiert sich auf laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme. Für diese Technologie werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Parameter wie die optische Leistung, der Nutzungsgrad, der Öffnungswinkel, die Modulverkipfung und die Flimmerwahrnehmung untersucht, vorgestellt und evaluiert. Das Ziel der Dissertation war, die Grundlage für die Einführung von hochauflösenden Pixellichtsystemen in ein Kraftfahrzeug zu schaffen.

Neben technischen Fragestellungen wird in dieser Arbeit auch der Nutzen von hochauflösenden Pixellichtsystemen in Bezug auf die Verkehrssicherheit eruiert. Dazu erfolgte im Rahmen dieser Arbeit eine Potentialanalyse. Sie ergab, dass bei Nacht Defizite in der Spurführung und Orientierung vorliegen. Um dies zu kompensieren, sollen neue Lichtfunktionen den Fahrer unterstützen. Eine dieser Lichtfunktionen könnte das „Baustellenlicht“ sein, bei dem gezielt Bereiche auf der Straße ausgeleuchtet werden, welche den Fahrer in der Spurführung und Orientierung unterstützen sollen.

---

In einem fundamentalen Systemvergleich wird für zwei unterschiedliche Ansätze und für fünf verschiedene Ablend- und Fernlichtfunktionen die optische Leistung und der Nutzungsgrad bestimmt. Im ersten Ansatz wird dazu die flächenmodulierte Technologie untersucht. Diese Technologie benötigt bei einem horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel von  $\pm 20^\circ$  beziehungsweise  $\pm 10^\circ$  eine optische Leistung von 1.904 W. Dabei wird, abhängig von der Lichtfunktion, über 95 % des Lichts absorbiert. Da der Nutzungsgrad im flächenmodulierten System der Absorptionsrate entspricht, muss diese Leistung nicht nur vorgehalten, sondern auch kontinuierlich abgerufen werden.

Die Leistungsanalyse des zweiten Ansatzes zeigt, dass die strahlgeführten Technologie im zwei Achsen resonanten Betrieb nicht zielführend ist, da die mittlere Leistung durch die additive Funktionsweise mit einer optischen Leistung von 31 W einerseits deutlich niedriger als beim flächenmodulierten System liegt, andererseits jedoch eine maximale optische Leistung von 634 W notwendig ist. Diese wird zwar nur kurzfristig abgerufen, ist aber in Form von Laserdioden vorzuhalten. Zur Reduzierung der optischen Leistung wird abschließend der quasistatische Betrieb untersucht, wobei sich zeigt, dass die in zwei Achsen quasistatisch betriebene Technologie die geringste maximale optische Leistung von 31 W benötigt. Wird der Mikrospiegel in einer Achse quasistatisch betrieben, so ist eine maximale optische Leistung von 183 W notwendig. Aufgrund der deutlich geringeren optischen Leistung und auf Basis eines durchgeführten Systemvergleichs wird in dieser

Arbeit ein quasistatisch betriebenes strahlgeführtes System verwendet, um die Lichtverteilungen zu erzeugen.

Damit die optische Gesamtleistung im definierten Zielbereich von sechs Laserdioden mit einer optischen Ausgangsleistung von je 2 W liegt, sind die leistungsbestimmenden Parameter einzugrenzen. Dazu sind die tatsächlichen Anforderungen an die Lichtfunktionen zu bestimmen. Hierzu müssen zunächst neuartige Lichtfunktionen entworfen und in einen Abblend- und Fernlichtbereich unterteilt werden. Für die Abblend- und Fernlichtfunktionen werden im Anschluss die notwendigen Öffnungs- und Schwenkwinkel auf Basis von theoretischen Berechnungen ermittelt. Aus diesen ergibt sich, dass bei einem Öffnungswinkel  $\alpha_d$  von  $12^\circ$ , je nach Schwenkstrategie, der Ausleuchtbereich für Abblendlichtfunktionen in Kurven bis zu einem Radius von 89 m bis 212 m abgedeckt ist. Die Schwenkung der Lichtverteilung von  $7,4^\circ$  nach innen deckt hierbei den kleinsten Kurvenradius ab. Für den ermittelten Kurvenradius sind, gemäß den Daten einer Verkehrsraumanalyse, über 90 % aller Kurven auf Landstraßen und Autobahnen in dem gewählten Projektionsbereich von 10 m bis 25 m ausleuchtbar.

Die benötigten Öffnungswinkel im Fernlichtbereich werden durch die Analyse mehrerer Studien ermittelt. Diese ergeben, dass eine hohe Auflösung notwendig ist, insbesondere im zentralen Sichtfeld. Es zeigt sich, dass eine Ausleuchtung von  $12^\circ$  bereits 70 % aller Objekte mit einer Objektgröße von weniger als  $3^\circ$  umfasst.

Zur Festlegung des vertikalen Öffnungswinkels werden in Abhängigkeit von verschiedenen Projektionsentfernungen und der Topografie die notwendigen Winkel ermittelt. Das Ergebnis ist, dass für Wannens- und Kuppenfahrten auf Landstraßen und Autobahnen maximal ein Winkel von  $0,27^\circ$  nach unten und  $0,68^\circ$  nach oben vorzuhalten ist.

Aufgrund der in dieser Arbeit vorgestellten Etendue-Limitierungen ist es notwendig, die genaue Auflösung zu bestimmen, wobei sich gezeigt hat, dass eine Auflösung von  $0,1^\circ$  im Fernlicht ausreichend ist. Die Auflösung für adaptive Abblendlichtfunktion ist abhängig vom projizierten Inhalt. Hierbei kann eine hohe Auflösung von  $0,02^\circ$  zum Beispiel für Kommunikationsfunktionen durchaus sinnvoll sein.

Durch einen im Rahmen des BMBF Förderprojekts „iLaS“ neu entwickelten Multi-Beam-Ansatz, bei dem der Spiegel in einer Achse quasistatisch betrieben wird, können die Systemanforderungen weiter reduziert und die durch die Etendue limitierte Auflösung verbessert werden. Die Einblendauflösung ist durch die Leuchtdichte und Lichtstrom auf einen Wert von  $0,41^\circ$  limitiert.

Aufgrund der limitierenden Auflösung wird aus der Vielzahl der neuartigen Lichtfunktionen die in dieser Arbeit vorgestellt werden, eine blendfreie Fernlichtfunktion ausgewählt, welche als „dynamischer Laserspot“ bezeichnet wird. Bei dieser Funktion ist, neben der Entblendung von Fahrzeugen auch der Öffnungswinkel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit anpassbar. Somit ist die

Lichtstärke allein durch die Auslenkung variierbar. Durch einen quasistatischen Betrieb ist es des Weiteren möglich, das Lichtstärkemaximum durch Änderung der Aufenthaltszeit zu verschieben. Zusätzlich kann die entblendete Lücke kontinuierlich verschoben werden.

Basierend auf der definierten Lichtverteilung, welche sich aus der Betrachtung der Öffnungswinkel ergibt, werden die realen Leistungswerte, über ein in dieser Arbeit entwickeltes Modell, bestimmt. Es ist festzustellen, dass die Leistung für eine Laserdiode durch einen quasistatischen Betrieb des Mikrospiegels auf unter 2,89 W gesenkt werden kann. Durch die experimentelle Anpassung der Mikrospiegelkennlinie wird es möglich, diese Leistung auf 1,92 W weiter zu reduzieren. Über alle Laserdioden zusammengerechnet wird eine maximale Leistung von 9,92 W abgerufen.

Der für die Systemauslegung wichtige Parameter der Flimmerwahrnehmung und die sich daraus ableitende Flimmerverschmelzungsfrequenz wird in dieser Arbeit durch eine experimentelle Studie bestimmt. Das statistisch ausgewertete Ergebnis zeigt, dass es keine signifikante Abhängigkeit der Flimmerwahrnehmung von der Geschwindigkeit gibt. Jedoch wurde ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Auflösung gefunden. Ein während der Fahrt zu erwartender Stroboskopeffekt konnte durch den Vergleich verschiedener Szenarien nicht nachgewiesen werden.

Für eine korrekte Darstellung von Funktionen im Abblendlicht und zum Ausgleich durch die Fahrzeugdynamik und Topografie

verursachten Winkeländerungen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entworfen mit dem eine korrekte Projektion möglich ist. Diese basiert auf dem Lochkameramodell, bei dem die Topografie und die Beobachterperspektive in der Projektion mit berücksichtigt werden.

### **8.2 AUSBLICK**

Die Digitalisierung von Technologien in unserem Alltag ist bereits Realität und auch die Automobilindustrie ist Teil dieses Wandels.

Durch die hochauflösenden Pixellichtsysteme kann sich auch die Scheinwerfertechnologie diese digitalen Möglichkeiten zu nutzen machen. Durch die hohe Variabilität der Lichtverteilung könnten Lichtfunktionen auch bei bereits ausgelieferten Fahrzeugen nachgeladen werden. Dies hätte auch den Vorteil, dass neu entwickelte Sicherheitsfunktionen keinen Austausch der Hardware nötig machen würden und sofort zur Verfügung stünden. Somit wäre das Fahrzeug immer auf dem aktuellen Stand der automobilen Lichttechnik. Durch eine angepasste Software könnte außerdem die Lichtverteilung an die gesetzlichen Anforderungen von verschiedenen Staaten angepasst werden, ohne die Hardware austauschen zu müssen. Selbst eine sichtbare Personalisierung des Fahrzeugs durch eine entsprechende Lichtprojektion ist denkbar. Um diese Möglichkeiten nutzen zu können ist die Fahrzeug-Topologie sowie die

Schnittstelle zum Scheinwerfer an die Anforderungen eines hochauflösenden Scheinwerfersystems anzupassen.

Damit neue hochauflösende Lichtfunktionen und Lichtverteilungen simuliert werden können, sind die jeweiligen Simulationsprogramme ebenfalls weiterzuentwickeln. So wird der Schwerpunkt in der lichttechnischen Simulation zukünftig die "abbildenden Optik" sein. Außerdem sind die „Rapid Prototyping“ Tools zur Darstellung von Lichtfunktionen anzupassen. Dies ist notwendig, da die neuen Lichtfunktionen bereits in einem Fahrsimulator mit der vollen Auflösung und im dynamischen Betrieb darstellbar sein sollten.

Um die hohe Auflösung nutzbar machen zu können ist die Scheinwerferkalibrierung an die Pixellichtsysteme anzupassen. Dafür eignet sich ein selbstkalibrierendes System, welches auf Basis der Fahrzeugkamera arbeitet. Detailliertere Erklärungen sind hierzu in der Arbeit von Söhner zu finden [SÖH15].

Für eine präzise Darstellung sind zukünftig Fahrzeugsensordaten konsequent zu fusionieren. Es müssen Umfelddaten bereitgestellt werden, um die Berechnung der Lichtverteilungen präzise durchführen zu können. Ist die Kalibrierung oder die Erfassung der Topografie ungenau, so führt dies zu Einschränkungen. Dann sollte beispielsweise eine Abblendlichtverteilung nur aus einem Matrix Scanner Modul erzeugt werden. Dadurch wird vermieden, dass die Pixel des linken- und rechten Scheinwerfers nicht korrekt überlappen oder der Übergang zwischen dem Ausleuchtbereich unpräzise ist.

Neben der Matrix-Scanner-Technologie auf Basis eines Konverters ist es sinnvoll in Zukunft auch weiter an der strahlgeführten Laser RGB Technologie zu arbeiten. Wie in den Arbeiten von Roth [ROT14a], [ROT15] sowie Kloppenburg [KLO16] und Flammersberger [FLA14] gezeigt wurde, bietet die RGB Technologie ein großes Potential. Beispielsweise kann die Tiefenschärfe eines solchen Systems dazu beitragen, die Unschärfe welche durch die sich ständig ändernde Projektionsebene entsteht, zu kompensieren. Außerdem kann eine höhere Auflösung und Effizienz erreicht werden, da kein Konverter notwendig ist. Die Farbdarstellung bietet darüber hinaus eine weitere Dimension der Anzeige. Durch die Verwendung der Laserdioden mit einer hohen Lichtstärke könnte dann beispielsweise die Fußgänger-Kommunikation mittels Licht auch bei Tag darstellbar sein. Damit die RGB Technologie eingesetzt werden kann, müssen grüne Laserdioden in einer entsprechenden Qualität verfügbar sein. Außerdem ist die Augensicherheit weiterhin zu untersuchen. Ist dies erfolgt, sind auch Projektionen im Heck auf Basis von roten Lasern mit einem Mikrospiegel realisierbar. Dadurch wäre auch der Funktionsumfang des Laserschlusslicht [HEL12] erweiterbar.

Natürlich muss auch die Entwicklung der LED sowie von flächenmodulierten Systemen weiter beobachtet werden. Wenn der DMD-Chip sowie die Leuchtdichte und der Lichtstrom der LED größer wird, sind optisch effizientere DMD Systeme umsetzbar. Die Koexistenz von mehreren Technologien sollte sowieso angestrebt



werden, da wie in dieser Arbeit gezeigt wird, jedes System seine Vor- und Nachteile hat.

Abschließend ist festzuhalten, dass in den nächsten Jahren ein verstärkter Einsatz von hochauflösenden Pixellichtsysteme im Scheinwerfer zu erwarten ist, um die Verkehrssicherheit durch den Einsatz neuer Lichtfunktionen zu erhöhen. Zusätzlich bietet ein solches System die Möglichkeit digitale Ansätze wie Personalisierung, Individualisierung und Funktion on Demand (FOD) umzusetzen. Darüber hinaus wird die Scheinwerfertechnologie auch zukünftig die Sicherheit beim autonomen Fahren nachhaltig verbessern, wobei hier der Schwerpunkt auf der Ausleuchtung für die Kamerasensorik und der Kommunikation und Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern liegt.

---

### III LITERATURVERZEICHNIS

- [ADA15] Adam Opel AG: Opel IntelliLux LED Matrix-Licht hilft Wildunfälle zu vermeiden. Pressemitteilung. Rüsselsheim, 01.12.2015
- [ALB15] Albrecht, K.; Austerschulte, A.; Rosenhahn, E.-O.: Reality Check: Laser High Beam Performance in Real Driving Tests. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 375–384
- [ALL15] Alliger, C.: Analyse und Benchmarking von Mikro-Opto-Elektro-Mechanischen Systemen (MOEMS) Spiegeln. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. Bachelorarbeit. 2015
- [ANH11] Anh, B.; Cho, H.; Oh, Y.: Intelligente Scheinwerfervorrichtung für ein Fahrzeug. Offenlegungsschrift. Hyundai Motor Co, Korea. Anmeldedatum: 27.07.2011. Veröffentlichungsnr. DE102011052184A1
- [AUD14] Audi AG: Der Audi R8 LMX : Erstes Serienmodell der Welt mit Laser-Fernlicht. Pressemitteilung. Neckarsulm, 09.05.2014
-

- [AUD15a] Audi AG: Audi zeigt Laser-Scheinwerfer des neuen R8. Pressemitteilung. Ingolstadt, 16.02.2015
- [AUD15b] Audi AG: Brand with the four rings shines at world's largest lighting congress. Pressemitteilung. Ingolstadt, 23.09.2015
- [AUS13] Austerschulte, A.; Dreier, B.; Rosenhahn, E.-O.: Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2013 - 10th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2013, S. 321–330
- [AUS14] Austerschulte, A.; Dreier, B.; Rosenhahn, E.-O.: Analyse von Sicherheitsaspekten adaptiver Matrix-Fernlicht Funktionen der nächsten Generation. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2014, S. 261–271
- [BAC07] Bachmann, V.: Studies on Luminescence and Quenching Mechanisms in Phosphors for Light Emitting Diodes, 2007
- [BAU13] Bauer, F.; Moser, A.; Altmann, J., et al.: Fahrzeugscheinwerfer mit Laserlichtquelle. Offenlegungsschrift. Zizala Lichtsysteme GmbH, Österreich. Anmeldedatum: 28.02.2013. Veröffentlichungsnr. WO2013134804A1

- [BEH15] Behr, R.: Ausführung und Evaluierung einer Probandenstudie zur Bestimmung der Flimmerfrequenz eines mehrzeiligen Pixelscheinwerfers. Ingolstadt, Technische Hochschule Ingolstadt. Bachelorarbeit. 2015
- [BER14a] Berlitz, S.: Abschlussbericht der Audi AG: SEEL – LED-Module für Automobilanwendungen. Ingolstadt. 2014
- [BER14b] Berlitz, S.; Gut, C.; Krstajic, V.: Laserscheinwerfer: Vom Motorsport zur Serie. In: Elektronik automotive (2014), Nr. 10, S. 44–48
- [BER14c] Berlitz, S.; Hamm, M.; Funk, C.: Matrix LED Scheinwerfer von Audi. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 116 (2014), Nr. 3, S. 10–15
- [BHA15] Bhakta, V.; Ballard, B.: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 483–494
- [BMW14] BMW Group: BMW Laserlicht geht in Serie. Pressemitteilung. München, 10.02.2014
- [BMW15] BMW Group: Deutschlandkampagne neuer BMW 7er. Pressemitteilung. München, 18.11.2015
- [BÖH12] Böhm, M.: Adaptive Frontbeleuchtungssysteme im Kraftfahrzeug: Ein Beitrag zur nächtlichen Verkehrssi-

- cherheit? Chemnitz, Technische Universität Chemnitz. Dissertation. 2012
- [BOR05] Bortz, J.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2005
- [BRE12] Brendle, M.: Lichtmodul. Offenlegungsschrift. Automotive Lighting Reutlingen GmbH. Anmeldedatum: 09.11.2012. Veröffentlichungsnr. DE102012220481A1
- [BRÜ32] Brückner, A.; Comberg, W.; Dittler, R., et al.: Physiologie - Optik Untersuchungsmethoden Bakteriologie. Wien: Springer Verlag, 1932
- [BUN11] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Mini-Laserprojektor für den mobilen Menschen. Pressemitteilung. Berlin, 27.07.2011
- [BUN13] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Integrierte  $\mu$ -strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme ( $\mu$ -AFS). Pressemitteilung. Berlin, 01.02.2013
- [BUN14a] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung. Pressemitteilung. Berlin, 01.04.2014

- [BUN14b] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer. Pressemitteilung. Berlin, 01.08.2014
- [BUN10] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung - Straßenverkehrsordnung (StVO) mit Anlagen. In: BAnz. 5206, 2010
- [CHA16] Chaves, J.: Introduction to nonimaging optics. 2. Auflage. Boca Raton, London, New York.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016
- [COH87] Cohen, A. S.: Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern: Bericht zum Forschungsprojekt FE 8306/3 im Auftrag der BASt. Bergisch Gladbach, 1987
- [COH09] Cohen, A. S.: Informationsaufnahme beim Kraftfahrer: Wahrnehmung und Sicherheitsverhalten. In: Burg, H.; Moser, A. (Hrsg.): Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, S. 217–234
- [COH88] Cohen, J.: Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. Auflage. Hillsdale: Erlbaum, 1988
- [DAM95] Damasky, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer. Darm-

- stadt, Technische Hochschule Darmstadt. Dissertation. 1995
- [DUS12] Dussault, D.; Nauen, A.; Gammer, C., et al.: Beleuchtungseinrichtung. Offenlegungsschrift. OSRAM GmbH, Deutschland. Anmeldedatum: 05.09.2012. Veröffentlichungsnr. DE102012215702A1
- [END97] Enders, M.: Beleuchtungseinrichtung für Fahrzeuge und Betriebsverfahren für eine derartige Beleuchtungseinrichtung. Offenlegungsschrift. Patent-Treuhand-Gesellschaft für elektrische Glühlampen mbH, Deutschland. Anmeldedatum: 29.08.1997. Veröffentlichungsnr. DE19737653A1
- [END01a] Enders, M.: Pixel Light. In: Schmidt-Clausen, H.-J. (Hrsg.). Progress in Automobile Lighting 2001: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2001, S. 234–239
- [END01b] Enders, M.: Beleuchtungssystem und Beleuchtungsverfahren. Offenlegungsschrift. Bayerische Motorenwerke AG, Deutschland. Anmeldedatum: 17.07.2001. Veröffentlichungsnr. DE10134594A1
- [ERD11] Erdl, H.; Abdelmalek, H.: Beleuchtungseinrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. Bayerische Motoren Werke AG, Deutschland. Anmeldedatum: 28.10.2011. Veröffentlichungsnr. DE102011085378A1

- [ERD12a] Erdl, H.; Abdelmalek, H.: Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. Bayerische Motoren Werke AG, Deutschland. Anmeldedatum: 03.04.2012. Veröffentlichungsnr. DE102012205435A1
- [ERD12b] Erdl, H.; Hanafi, A.: Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. Bayerische Motoren Werke AG, Deutschland. Anmeldedatum: 03.04.2012. Veröffentlichungsnr. DE102012205437A1
- [ERD12c] Erdl, H.; Hanafi, A.: Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. Bayerische Motoren Werke AG, Deutschland. Anmeldedatum: 18.12.2012. Veröffentlichungsnr. DE102012223610A1
- [FIN10] Finsterbusch, K.; Hartwig, U.: Leuchtvorrichtung. Offenlegungsschrift. Osram AG, Deutschland. Anmeldedatum: 06.12.2010. Veröffentlichungsnr. DE102010062460A1
- [FIS14] Fischer, B.: Ein Ansatz zur Realisierung eines hochauflösenden und mechanikfreien, adaptiven Frontscheinwerfers. In: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.). Licht 2014: Tagungsband, 2014, S. 108–114
- [FLA14] Flammersberger, G.: Potential eines RGB-Lasers als Frontscheinwerfersystem im Automobil. Ingolstadt, Technische Hochschule Ingolstadt. Bachelorarbeit. 2014



- [FRI15] Fries, B.; Gut, C.; Laudenbach, T., et al.: Laser Light for the Audi R18 e-tron quattro Racing Car. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 116 (2015), Nr. 6, S. 24–27
- [FUN15] Funk, C.; Reim, J.; Omerbegovic, S.: New world of lighting based driver assistance systems: Good bye low beam. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 131–136
- [GAU68] Gaugel, M.: Kraftfahrzeugscheinwerfer-System. Offenlegungsschrift. Patent-Treuhand-Gesellschaft für elektrische Glühlampen mbH, Deutschland. Anmelde-datum: 16.07.1968. Veröffentlichungsnr. DE1755960A1
- [GOL11] Goldstein, E.: Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs. 7. Auflage. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2011
- [GÖT05] Götz, M.; Eichhorn, K.: Optical Technologies for Future Headlamps. In: Schlaak, H. F. (Hrsg.). 6th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2005, S. 307–316
- [GRI05] Griesinger, M.; Hoffmann, H.; Holz, M., et al.: Multifunctional Use of Semiconductor Based Car Lighting Systems: Potentials and Challenges. In: Schlaak, H. F. (Hrsg.). 6th International Symposium on Automotive

- Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2005, S. 73–81
- [GRÖ15] Grötsch, S.; Pfeuffer, A.; Liebetrau, T., et al.: Integrated High Resolution LED Light Sources in an AFS/ADB Headlamp. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 241–250
- [GÜN10] Günther, A.: Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array. Berlin, Technische Universität Berlin. Dissertation. 2010
- [GUT11] Gut, C.: Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrzeugführern in Kurven bei Nacht. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Studienarbeit. 2011
- [GUT13a] Gut, C.: Beleuchten einer Fahrzeugumgebung. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldenr. 14635, Deutschland. Anmeldedatum: 20.12.2013. Veröffentlichungsnr. DE 10 2013 021 941 A1
- [GUT14a] Gut, C.: System und Verfahren zum Steuern der Lichtverteilung eines laserbasierten Pixellichtsystems von wenigstens einer fahrzeugseitigen Scheinwerferanordnung. Audi AG. Anmeldenr. 16424, Deutschland. Anmeldedatum: 05.11.2014. Veröffentlichungsnr. DE102014016336 A1

- [GUT14b] Gut, C.; Berlitz, S.: Laser headlamp: Experiences in motor sports for series development. In: Société des Ingénieurs de l'Automobile (Hrsg.). Vision 2014: Tagungsband, 2014
- [GUT16a] Gut, C.; Cristea, I.; Neumann, C.: High-resolution headlamp. In: Advanced Optical Technologies 5 (2016), Nr. 2, S. 109–116
- [GUT15] Gut, C.; Petersen, A.; Jahn, P., et al.: Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). ELIV - Kongress zur Fahrzeugelektronik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2015, S. 277–292
- [GUT14c] Gut, C.; Rotscholl, I.; Neumann, C.: Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2014, S. 15–30
- [GUT16b] Gut, C.; Vargas, J.: Dimmen einer Lichtquelle. Audi AG. Anmeldenr. 102016002558.1, Deutschland. Anmeldedatum: 04.03.2016
- [GUT16c] Gut, C.; Vargas, J.; Berlitz, S., et al.: Neuartige Lichtfunktionen auf Basis hochauflöser Scheinwerfersysteme, Bd. 2278. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2016, S. 25–36

- [GUT13b] Gut, C.; Wilhelmy, J.: Beleuchtungseinrichtung für ein Kraftfahrzeug und Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldenr. 13858, Deutschland. Anmeldedatum: 02.10.2013. Veröffentlichungsnr. DE10201316423A1
- [GUT13c] Gut, C.; Wilhelmy, J.: System und Verfahren zum augensicheren Betreiben eines Fahrzeugscheinwerfers. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldenr. 14623, Deutschland. Anmeldedatum: 20.12.2013. Veröffentlichungsnr. DE102013021942A1
- [HAG14] Hagemann, Volker: Ceramic Phosphors Enable High Luminance Light Sources. In: Luger Research e.U. - Institute for Innovation & Technology (Hrsg.). LED professional Symposium: Tagungsband. Bregenz, 2014
- [HÄR06] Härle, V.; Lell, A.; Ott, H., et al.: Lichtemittierende Vorrichtung. Offenlegungsschrift. OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Deutschland. Anmeldedatum: 26.06.2006. Veröffentlichungsnr. DE102006029203A1
- [HEL16] HELLA KGaA Hueck & Co.: Multibeam-LED Scheinwerfer von HELLA : Eine ausgezeichnete Klasse für sich. Pressemitteilung. Lippstadt, 30.03.2016
- [HEL12] Helmer, M.: Sicherheitskritische Analyse eines laserbasierenden Nebelschlusslichts. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Studienarbeit. 2012

- [HES15] Hesse, H.: BMBF-Project VOLIFA 2020 - High resolution light distribution by using a LCD. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 495–502
- [HOF03] Hoffmann, A. v.: Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau. Dissertation. 2003
- [HOF01] Hoffmann, A. von: Eigenschaften der Schlechtwetterlichtfunktion eines adaptiven Scheinwerfers (AFS) bei regennasser Fahrbahn. In: Elektronik im Kraftfahrzeug: Tagungsband: VDI Verlag, 2001 (1646).
- [HOF14] Hofmann, U.; Senger, F.; Janes, J., et al.: Wafer-level vacuum-packaged two-axis MEMS scanning mirror for pico-projector application. In: Piyawattanametha, W.; Park, Y.-H. (Hrsg.). MOEMS and Miniaturized Systems XIII: Tagungsband, 2014
- [HOF16] Hofmann, U.; von Wantoch, T.; Gu-Stoppel, S., et al.: Verfahren zur dynamischen Lichtverteilungs-Steuerung in Scheinwerfern basierend auf resonanten MEMS-Laser Scannern, Bd. 2278. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2016, S. 281–292

- [HRI09] Hristov, B.: Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2009
- [HUH99] Huhn, W.: Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 1999
- [HUM10] Hummel, B.: Blendfreies LED-Fernlicht. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH). Dissertation. 2010
- [HUM09] Hummel, B.; Berlitz, S.; Böhn, M.: Tausend Lumen Weiß - Nanolux: Schlussbericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Ingolstadt. 2009
- [IHS14] IHS Automotive: The Advanced Automotive Lighting and Vision Systems: Sectoral Report. In: IHS Automotive SupplierBusiness (2014)
- [JAE15] Jaeckel, T.; Kroll, A.; Markus, K.: AXA Verkehrssicherheitsreport. 2015
- [JAH16] Jahn, P.: Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme, Bd. 2278. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2016
- [JEB12] Jebas, C.: Physiologische Bewertung aktiver und Passiver Lichtsysteme im Automobil. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation. 2012

- [KAU06] Kauschke, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Paderborn, Universität Paderborn. Dissertation. 2006
- [KAU14] Kauschke, R.; Schopp, C.; Kling, R.: Was sind die automotive-Lichtquellen der Zukunft? In: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.). Licht 2014: Tagungsband, 2014
- [KIS11a] Kishimoto, K.: Light-emitting Device, Illumination Device, and Vehicle Headlight. Offenlegungsschrift. Sharp Kabushiki Kaisha, Japan. Anmeldedatum: 10.05.2011. Veröffentlichungsnr. US20110280032A1
- [KIS11b] Kishimoto, K.; Takahasi, K.; Ito, S., et al.: Light emitting device, illuminating device, and vehicle headlight. Patentschrift. Sharp Kabushiki Kaisha, Japan. Anmeldedatum: 08.02.2011. Veröffentlichungsnr. US8833991B2
- [KLO16] Kloppenburg, G.; Roth, J.; Wolf, A., et al.: Optische Eigenschaften eines RGB Laserprojektionsmoduls für den Verkehrsraum, Bd. 2278. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2016, S. 255–268
- [KOC15] Koch, F.: Konzeptionierung sowie Modifikation eines LED-Pixel-Scheinwerfers zur experimentellen Analyse strahlgeführter dynamischer Laserlichtsysteme. Darmstadt, Hochschule Darmstadt. Masterarbeit. 2015

- [KUH06] Kuhl, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichts an den vertikalen Straßenverlauf. Universität Paderborn. Dissertation. 2006
- [LEE13] Lee, B.: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology: Application Report DLPA008A by Texas Instruments. 2013
- [LEE11] Lee, T.; Park, G.; Kim, H., et al.: The Development of the Automotive Headlamp using the DMD. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2011 - 9th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2011, S. 524–534
- [LEI77] Leibowitz, H. W.; Owens, D. A.: Nighttime Driving Accidents and Selective Visual Degradation. In: Science 197 (1977), Nr. 4302, S. 422–423
- [LEI98] Leibowitz, H. W.; Owens, D. A.; Tyrell, R. A.: The Assured Clear Distance Ahead Rule: Implications for Nighttime Traffic Safety and the Law. In: Accident Analysis and Prevention (1998), Nr. 30, S. 93–99
- [LIE15] Liebetrau, T.; Pohlmann, W.; Moisel, J., et al.: Ein neuer Ansatz für hochauflösende LED-Pixel-Scheinwerfer. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). ELIV - Kongress zur Fahrzeugelektronik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2015, S. 265–276



- [MAN07] Manz, K.; Kooß, D.; Klinger, K., et al.: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit. Bergisch Gladbach. 2007 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen)
- [MAZ14] Mazda Motor Europe GmbH: Mazda launching 2015 Mazda 6 and 2015 Mazda CX-5. Pressemitteilung. Leverkusen, 16.12.2014
- [MEN15] Menold, N. ; Bogner, K.: GESIS - Leibniz Institute for the Social Sciences: Gestaltung von Ratingskalen in Fragebögen. URL [http://www.gesis.org/fileadmin/upload/SDMwiki/Archiv/Ratingskalen\\_MenoldBogner\\_012015\\_1.0.pdf](http://www.gesis.org/fileadmin/upload/SDMwiki/Archiv/Ratingskalen_MenoldBogner_012015_1.0.pdf) – Überprüfungsdatum 02.07.2016
- [MER14] Mercedes Benz: Neue Generation CLS mit hochauflösender Präzisions-LED-Technik der Zukunft : Vorsprung durch besseres Licht. Pressemitteilung. Stuttgart, 16.06.2014
- [MIC14a] Michel, K.: Segmenteinteilung eines mehrzeiligen blendfreien Fernlichts. Zwickau, Westsächsische Hochschule Zwickau. Diplomarbeit. 2014
- [MIC14b] Michenfelder, Steffen: Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation. 2014

- [MOE16] Moellers, I.; Moisel, J.; Fiederling, R., et al.: Ein effizienter hochauflösender ADB-Scheinwerfer auf Basis von mikrointegrierten LED-Arrays, Bd. 2278. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Düsseldorf: VDI Verlag, 2016, S. 37–50
- [MOI15] Moisel, J.: Requirements for future high resolution ADB modules, Bd. 16. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 161–169
- [MOI09] Moisel, J.; Ackermann, R.; Griesinger, M.: Adaptive Headlights utilizing LED-Arrays. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2009 - 8th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2009, S. 287–296
- [MOO12] Moosbrugger, H.; Kelava, A.: Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2012
- [MOR08] Moreno, I.; Ching-Cherng, S.: LED array: where does far-field begin?, Bd. 7058. In: 8th International Conference on Solid State Lighting: Tagungsband, 2008
- [MÜH13] Mühlstedt, J.; Roßner, P.; Bullinger, A.: Die dunkle Seite des Lichts - Diskomfort durch Flicker bei LED-Lichtern im Straßenverkehr in Bezug zu peripheren Flimmer-

- verschmelzungsfrequenzen. In: 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme: Tagungsband. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2013, S. 408–414
- [NIS11] Nishiura, S.; Tanabe, S.; Fujioka, K., et al.: Properties of transparent Ce:YAG ceramic phosphors for white LED. In: *Optical Materials* 33 (2011), Nr. 5, S. 688–691
- [OSR15] Osram Opto Semiconductors: Datenblatt: Blue Laser Diode in TO56 Package Version 0.3: PL TB450B. 2015
- [PET15] Petersen, A.; Hager, J.; Gut, C., et al.: Challenges for MEMS based Scanning Laser System. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). *ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 355–364
- [PET14] Pettitt, G.; Thompson, J.; Ferri, J., et al.: Comparison of solid-state illumination sources for the development of automotive head-up displays based on DLP technology. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2014, S. 3–14
- [POL15] Polin, D.: Physiologische Effekte bei PMW-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil. In: *FAT-Schriftenreihe* 270 (2015)
- [POL13] Polin, D.; Khanh, T. Q.: Flickering effects of vehicle exterior light systems and consequences. In: Khanh, T.

- Q. (Hrsg.). ISAL 2013 - 10th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2013, S. 253–257
- [REI11] Reiners, T.: Scheinwerfermodul. Europäische Patentschrift. OSRAM GmbH, Deutschland. Anmelde-  
datum: 06.05.2011. Veröffentlichungsnr. EP2507545B1
- [REI14] Reinprecht, M.; Bauer, F.: Scheinwerfer für ein  
Kraftfahrzeug und Verfahren zum Erzeugen einer  
Lichtverteilung. Offenlegungsschrift. Zizala Lichtsys-  
teme GmbH, Österreich. Anmeldedatum: 21.01.2014.  
Veröffentlichungsnr. WO2014121314A1
- [REI15a] Reinprecht, M.; Winterer, N.; Hartmann, P.: Solution  
Paths Towards High-Resolution ADB-Systems, Bd. 11.  
In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International  
Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband.  
München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 177–186
- [REI15b] Reisinger, B.; Reinprecht, M.; Pürstinger, J., et al.:  
Potentials of MEMS-based scanners and DMD arrays  
with high luminance LED and Laser light sources. In:  
Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International  
Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband.  
München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 473–482
- [ROS05a] Roslak, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersys-  
tems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehr-

- sraums. Paderborn, Universität Paderborn. Dissertation. 2005
- [ROS05b] Roslak, J.; Kauschke, R.: Active Headlamps for Increased Traffic Safety. In: Schlaak, H. F. (Hrsg.). 6th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2005, S. 317–332
- [ROS04] Roslak, J.; Richter, B.: Verfahren zur Erzeugung einer Lichterzeugungseinrichtung für Kraftfahrzeuge sowie Vorrichtung. Offenlegungsschrift. Hella KGaA Hueck & Co, Deutschland. Anmeldedatum: 30.08.2004. Veröffentlichungsnr. DE102004042092A1
- [ROT16] Roth, J.: Untersuchung von elektrodynamischen Microscannern zur Darstellung von Lichtssymbolen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Leibniz Universität Hannover. Dissertation. 2016
- [ROT14a] Roth, J.; Meyer, B.; Thomschke, S.: Laser Scanning Unit for Light Symbol Projection. In: Société des Ingénieurs de l'Automobile (Hrsg.). Vision 2014: Tagungsband, 2014
- [ROT15] Roth, J.; Wallaschek, J.; Kloppenburg, G., et al.: RGB-Laser-Scanning-Module for onroad projection. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 385–394

- [ROT14b] Rotscholl, I.; Gut, C.; Nagy, P.: Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug mit zwei Typen von Leuchteinrichtungen. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldnr. 15122, Deutschland. Anmeldedatum: 29.01.2014. Veröffentlichungsnr. DE102014001201A1
- [SCH10] Scherr, M.; Blum, D.: Beleuchtungseinrichtung eines Kraftfahrzeugs. Patentschrift. Automotive Lighting Reutlingen GmbH, Deutschland. Anmeldedatum: 15.10.2010. Veröffentlichungsnr. DE102010048659B4
- [SCH14] Schmidt, C.; Wilks, C.: High Definition Concepts for Next Generation ADB Module. In: Société des Ingénieurs de l'Automobile (Hrsg.). Vision 2014: Tagungsband, 2014
- [SCH11] Schneider, D.: Markierungslicht: Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. Dissertation. 2011
- [SCH12] Schulz, R.: Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2012
- [SCH03a] Schwab, G.: Untersuchung zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau. Dissertation. 2003

- [SCH03b] Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. München, Technische Universität München. Dissertation. 2003
- [SEK88] Seko, Y.; Saito, T.: Vehicle headlamp. Patentschrift. Nissan Motor Company. Anmeldedatum: 28.03.1988. Veröffentlichungsnr. US 4985816 A
- [SEN15] Senger, F.; Hofmann, U.; Wantoch, T. von, et al.: Centimeter-scale MEMS scanning mirrors for high power laser application. In: Piyawattanametha, W.; Park, Y.-H. (Hrsg.). SPIE Opto: Tagungsband, 2015
- [SOA88] Soardo, P.: A headlamp for motor vehicles with programmable light distribution. Patentschrift. Soardo Paolo, Italien. Anmeldedatum: 10.05.1988. Veröffentlichungsnr. EP0291475B1
- [SÖH15] Söhner, S.: Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation. 2015
- [SON02] Sontheimer, A. B.: Digital Micromirror Device (DMD) hinge memory lifetime reliability modeling. In: Electronic Device Society (Hrsg.). IEEE International Reliability Physics Symposium. 40th Annual: Tagungsband. Dallas, 2002, S. 118–121

- [STÄ08] Stämpfle, M.; Branz, W.: Kollisionsvermeidung im Längsverkehr – die Vision vom unfallfreien Fahren rückt näher. Vortrag In: Active Safety through Driver Assistance. München, 2008
- [STR07] Strauß, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Paderborn, Universität Paderborn. Dissertation. 2007
- [TAK11] Takahashi, K.; Takahira, Y.; Maemura, Y., et al.: Laser headlight for Next Generation Automotive Lighting. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2011 - 9th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2011, S. 271–283
- [TAN07] Taner, A.: Beleuchtungsvorrichtung eines Fahrzeugs. Patentschrift. Audi AG, Deutschland. Anmeldedatum: 21.11.2007. Veröffentlichungsnr. DE102007055480B3
- [TEX15] Texas Instruments: Datenblatt: DLP3000 DLP 0.3 WVGA Series 220 DMD. Dallas. 2015
- [TOT08] Totzauer, A.: Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. Studienarbeit. 2008
- [WEG09] Wegwerth, C.; Hilgenstock, J.; Thomschke, S.: Scheinwerfersystem für ein Fahrzeug mit einem Bildgeber. Offenlegungsschrift. Volkswagen AG, Deuts-



- chland. Anmeldedatum: 12.05.2009. Veröffentlichungsnr. DE102009020910A1
- [WEI02] Weisstein, E.: CRC Concise Encyclopedia of Mathematics. 2 Auflage. Boca Raton: CRC Press, 2002
- [WER13] Werkstetter, M.: Steuervorrichtung zur Ansteuerung einer Laserdiode. Offenlegungsschrift. Bayerische Motoren Werke AG, Deutschland. Anmeldedatum: 25.07.2013. Veröffentlichungsnr. WO2014/019934A1
- [WER14] Werkstetter, M.; Weber, S.; Hirth, F., et al.: Laserlicht im BMW i8 Ansteuerung und E/E-Integration. In: ATZ-elektronik 9 (2014), Nr. 4, S. 26–31
- [WIL14a] Wilhelmy, J.; Gut, C.: Scheinwerfer für einen Kraftwagen sowie ein Kraftwagen. Patentschrift. Audi AG. Anmeldenr. 16088, Deutschland. Anmeldedatum: 06.09.2014. Veröffentlichungsnr. DE102014013202B3
- [WIL15] Wilhelmy, J.; Gut, C.: Laser Headlamps: Key factors and improvement. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.). ISAL 2015 - 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015, S. 405–414
- [WIL14b] Willeke, B.: Laser basierte Lichtquellen in der Automobilbeleuchtung: Erzeugung einer weißen Hinterleuchtung durch RGB Laserdioden. In: Deutsche

- Lichttechnische Gesellschaft e.V. (Hrsg.). Licht 2014: Tagungsband, 2014
- [WIR06] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen, Regelung Nr. 48 (2006)
- [WIR13] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa: Uniform provisions concerning the approval of Adaptive Front-Lighting Systems (AFS) for motor vehicles, Regelung Nr. 123 (2013)
- [WÖL10] Wölfling, B.; Hatzenbühler, A.; Meinel, J.: Laserbasierte Weißlichtquelle. Offenlegungsschrift. Schott AG, Deutschland. Anmeldedatum: 11.08.2010. Veröffentlichungsnr. DE102010034054A1
- [WÖR07] Würdenweber, B.; Wallaschek, J.; Boyce, P., et al.: Automotive Lighting and Human Vision. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2007
- [XIA10] Xiao, S. Y.; Pan, Y. X.; Ma, Y. Y., et al.: Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties. In: Materials Science and Engineering Reports (2010), Nr. 71, S. 1–34

- [YAM13] Yamamura, S.; Yagi, T.: Fahrzeugleuchte und Verfahren zur Steuerung derselben. Offenlegungsschrift - Übersetzung. Koito Manufacturing Co.,Ltd, Japan. Anmeldedatum: 15.05.2013. Veröffentlichungsnr. DE112013003050T5

---

## IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1:	Darstellung der Winkel zur Berechnung der zweidimensionalen Etendue.....	9
Abbildung 2.2:	Integrationsgrenzen zur Berechnung der zweidimensionalen Etendue.....	9
Abbildung 2.3:	Längenangaben zur Berechnung der dreidimensionalen Etendue eines Rechtecks.....	11
Abbildung 2.4:	Längenangaben zur Berechnung der dreidimensionalen Etendue einer Ellipse.....	11
Abbildung 2.5:	Exemplarische Darstellung von ausgeblendeten Objekten eines blendfreien Fernlichts.....	15
Abbildung 2.6:	Exemplarische Darstellung des Ausleuchtbereichs eines programmierbaren Abblendlichts.....	15
Abbildung 3.1:	Darstellung der Anzahl der jährlichen Patentanmeldungen unter dem Suchbegriff „Headlight“ und „Headlamp“ in der Klassifikation CPC F21Y2101/025.....	23
Abbildung 3.2:	Übersicht über verschiedene hochauflösende Pixellichtsysteme und deren Unterteilung in flächenmodulierte und strahlgeführte Systeme.....	28
Abbildung 3.3:	Darstellung der im Mittel wahrgenommenen Leuchtdichte $L_m$ für	

---

	zwei unterschiedliche Lichtpulse mit unterschiedlicher Intensität und Dauer nach Brückner [BRÜ32].....	29
Abbildung 3.4:	Eingereichte Erfindungen unter dem Suchbegriff „Micromirror“ in der Klassifikation „Leuchten besonders ausgebildet für Fahrzeuge“.....	38
Abbildung 3.5:	Eingereichte Anmeldungen unter dem Suchbegriff „LED Array“ in der Klassifikation „Scheinwerfer“.....	39
Abbildung 3.6:	Patentanmeldung pro Jahr unter dem Suchbegriff „LCD“ in der Klassifikation IPC B60Q1/04, „Scheinwerfer“.....	40
Abbildung 3.7:	Patentanmeldung pro Jahr unter dem Suchbegriff „DMD“ in der Klassifikation IPC F21S8/10, „Leuchten besonders ausgebildet für Fahrzeuge“.....	41
Abbildung 4.1:	Funktionsprinzip Matrix-Scanner-Technologie [BUN11].	46
Abbildung 4.2:	Funktionsprinzip Matrix-DMD-Technologie [AUD15b].	46
Abbildung 4.3:	Darstellung der Lichtverteilung eines Abblendlichts; Funktion 1.	52
Abbildung 4.4:	Darstellung der Lichtverteilung eines Abblend- und Fernlichts; Funktion 2.	53
Abbildung 4.5:	Darstellung der Lichtverteilung eines blendfreien Fernlichts; Funktion 3.	53
Abbildung 4.6:	Darstellung der Lichtverteilung eines Markierungslichts; Funktion 4.	54

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 4.7:	Darstellung der Lichtverteilung einer adaptiven Abblendlichtfunktion; Funktion 5.....	54
Abbildung 4.8:	Darstellung eines Pixels $a_{ij}$ und dessen Winkelgrößen. ....	58
Abbildung 4.9:	Darstellung des Winkels zwischen der Flächennormalen und einem Pixel $a_{ij}$ . ....	58
Abbildung 4.10:	Darstellung der Lichtstrommatrix eines Abblendlichts, Funktion 1. ....	59
Abbildung 4.11:	Darstellung der Lichtstrommatrix eines Abblend- und Fernlichts, Funktion 2. ....	60
Abbildung 4.12:	Darstellung der Lichtstrommatrix eines blendfreien Fernlichts, Funktion 3. ....	60
Abbildung 4.13:	Darstellung der Lichtstrommatrix eines Markierungslichts, Funktion 4. ....	61
Abbildung 4.14:	Darstellung der Lichtstrommatrix einer adaptiven Abblendlichtfunktion, Funktion 5.....	61
Abbildung 4.15:	Beispielhafter Scanverlauf eines Laserspots im resonant 2D Betrieb. ....	62
Abbildung 4.16:	Beispielhafter Scanverlauf eines Laserspots im quasistatisch 2D Betrieb.....	63
Abbildung 4.17:	Beispielhafter Scanverlauf eines Laserspots im resonant / quasistatischer Betrieb.....	63
Abbildung 4.18:	Darstellung der Integrationsgrenzen für die Berechnung der Aufenthaltszeit innerhalb eines Pixels $a_{ij}$ . ....	67
Abbildung 5.1:	Darstellung der Messpunkte gemäß ECE R123 [WIR13]. ....	82

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5.2:	Histogramm der Kurvenhäufigkeit auf Landstraßen nach Daten von Schwab [SCH03a].	89
Abbildung 5.3:	Histogramm der Kurvenhäufigkeit auf Autobahnen nach Daten von Schwab [SCH03a].	89
Abbildung 5.4:	Histogramm von der Kuppen und Wannenhäufigkeit auf Landstraßen nach Daten von Kuhl [KUH06].	90
Abbildung 5.5:	Histogramm von der Kuppen und Wannenhäufigkeit auf Autobahnen nach Daten von Kuhl [KUH06].	90
Abbildung 5.6:	Fall 1, keine Schwenkung.	91
Abbildung 5.7:	Fall 2, Schwenkung nach innen.	91
Abbildung 5.8:	Fall 3, Schwenkung nach außen.	91
Abbildung 5.9:	Darstellung des Projektionsabstands und der Projektionslänge, sowie der vertikalen Winkel.	93
Abbildung 5.10:	Abhängigkeit des vertikalen Öffnungswinkel $\Delta\beta$ von der Projektionslänge $l_{\text{Pro}}$ und von drei verschiedenen Anbauhöhen des Scheinwerfers $h_{\text{Sch}}$ bei einem konstanten Projektionsabstand $l_{\text{PAb}}$ von 10 m.	94
Abbildung 5.11:	Betrag des Winkels $\beta_{\text{PAb}}$ in Abhängigkeit des Projektionsabstands $l_{\text{PAb}}$ für drei verschiedene Anbauhöhen $h_{\text{Sch}}$ des Scheinwerfers.	95

Abbildung 5.12: Darstellung des vertikalen Winkels  $\beta_{PAB}$  in Abhängigkeit des Projektionsabstands  $l_{PAB}$  und der Kuppenhöhe  $h'$  in Kuppenfahrten. .... 96

Abbildung 5.13: Exemplarische Darstellung einer Kuppe sowie der Parameter, welche zu Berechnung der Kuppenhöhe  $h'$  notwendig sind. .... 96

Abbildung 5.14: Darstellung der Verschiebung des vertikalen Winkels in Abhängigkeit des Kuppenradius bei einer Anbauhöhe von  $h_{Sch} = 0,65$  m. .... 98

Abbildung 5.15: Darstellung der Verschiebung des vertikalen Winkels in Abhängigkeit des Wannensradius bei einer Anbauhöhe von  $h_{Sch} = 0,65$  m. .... 99

Abbildung 5.16: Darstellung von drei verschiedenen Positionen eines Fahrzeugs beim Durchfahren einer Linkskurve. .... 101

Abbildung 5.17: Darstellung der Winkel und Abstände für den Fall 1, Matrix Scanner Modul nicht geschwenkt. .... 102

Abbildung 5.18: Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\alpha_d$ , der benötigt wird um die eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m auszuleuchten, in Abhängigkeit des Kurvenradius  $r$ . .... 104

Abbildung 5.19: Darstellung der Winkel und Abstände für den Fall 2, Matrix Scanner Module nach innen zur Fahrzeuglängsachse geschwenkt. .... 105



Abbildung 5.20:	Öffnungswinkel, der benötigt wird um die eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m auszuleuchten, in Abhängigkeit des Kurvenradius r.....	107
Abbildung 5.21:	Darstellung der Winkel und Abstände für den Fall 3, Matrix Scanner Module nach außen geschwenkt. ....	108
Abbildung 5.22:	Öffnungswinkel $\alpha_d$ , der benötigt wird um die eigene Fahrspur zwischen 10 m und 25 m auszuleuchten, in Abhängigkeit des Kurvenradius r.....	109
Abbildung 5.23:	Darstellung der prozentualen Erfassung von auszublendenden Objekten in Abhängigkeit des Öffnungswinkels nach Totzauer [TOT08].....	111
Abbildung 5.24:	Aktivierungsrate eines blendfreien Fernlichts in Abhängigkeit der Segmentgröße und des Ausleuchtbereichs [AUS14]. ....	112
Abbildung 5.25:	Ausblendauflösung eines rechten Scheinwerfers für entgegenkommende und vorrausfahrende Fahrzeuge sowie von zwei Verkehrsschildern, dargestellt in Abhängigkeit der Entfernung zum auszublendenden Objekt. ....	118
Abbildung 6.1:	Darstellung der peripheren FVF in Abhängigkeit des horizontalen Sichtfelds [MÜH13]. ....	125

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6.2:	Darstellung der peripheren FVF in Abhängigkeit des vertikalen Sichtfelds [MÜH13].....	126
Abbildung 6.3:	Versuchsscheinwerfer des „SEEL“ Förderprojekts [BER14a]. .....	130
Abbildung 6.4:	Darstellung der Teststrecke. ....	132
Abbildung 6.5:	Ablaufdiagramm von Szenario 1, bei dem die absteigende / aufsteigende Flimmerwahrnehmung ohne Dynamik ermittelt wird. ....	134
Abbildung 6.6:	Darstellung des Szenarios 2 [BEH15]. ....	135
Abbildung 6.7:	Ablaufdiagramm von Szenario 2a, bei dem die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt wird. ....	136
Abbildung 6.8:	Ablaufdiagramm von Szenario 2b, bei dem die Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit der Pixelgröße ermittelt wird. ....	137
Abbildung 6.9:	Darstellung des Probandenalters. ....	138
Abbildung 6.10:	Darstellung der Referenzfrequenz für aufsteigenden und absteigenden Frequenzverlauf mit $n_P = 35$ . ....	143
Abbildung 6.11:	Darstellung der Flimmerwahrnehmung mit $n_P = 34$ Probanden für Szenario 2a in Abhängigkeit der Frequenz und der Geschwindigkeit.....	144
Abbildung 6.12:	Darstellung der Flimmerwahrnehmung mit $n_P = 34$ Probanden für Szenario 3 in	

	Abhängigkeit der Frequenz und der Geschwindigkeit.....	145
Abbildung 6.13:	Darstellung der Unterschiede in der Flimmerwahrnehmung bei 50 km/h und einer feinen beziehungsweise groben Pixelauflösung für $n_P = 34$ .....	146
Abbildung 6.14:	Darstellung der Unterschiede in der Flimmerwahrnehmung bei 100 km/h und einer feinen beziehungsweise groben Pixelauflösung für $n_P = 34$ .....	146
Abbildung 6.15:	Vergleich der Flimmerwahrnehmung zwischen einem großen Reflexionsbereich aus Szenario 2a und einem kleinen Reflexionsbereich aus Szenario 3 bei 60 Hz und 100 km/h.....	149
Abbildung 6.16:	Vergleich der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit des Alters für das Szenario 2a bei 50 km/h mit einer Altersgruppe <40 mit $n_P = 17$ und +40 mit $n_P = 17$ .....	150
Abbildung 6.17:	Vergleich der Flimmerwahrnehmung in Abhängigkeit des Alters für das Szenario 3 bei 40 km/h mit einer Altersgruppe <40 mit $n_P = 17$ und +40 mit $n_P = 17$ .....	151
Abbildung 7.1:	Ausleuchtbereich des Gesamtscheinwerfers, bestehend aus einem LED Abblendlicht, einem Matrix LED Fernlicht und einem dynamischen Laserspot.....	155

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 7.2:	Darstellung der simulierten Lichtverteilung eines „dynamischen Laserspots“ im statischen Betrieb; Funktion 1.....	156
Abbildung 7.3:	Darstellung der simulierten Lichtverteilung eines „dynamischen Laserspots“ mit Entblendung eines Standardfahrzeugs in 30 m Entfernung; Funktion 2.....	156
Abbildung 7.4:	Darstellung der simulierten Lichtverteilung eines „dynamischen Laserspots“ mit Markierung einer Person in 65 m Entfernung; Funktion 3.....	157
Abbildung 7.5:	Darstellung des Spotradius $r_{kon}$ eines Laserdiodenstrahls in Abhängigkeit des von einem Konverter emittierenden Lichtstroms $\Phi_v$ für zwei Leuchtdichten $L_v$ .....	159
Abbildung 7.6:	Darstellung der Einblendauflösung $\alpha_E$ in Abhängigkeit vom Linsenradius $r_{Optik}$ und dem Lichtstrom $\Phi_v$ .....	161
Abbildung 7.7:	Skizze zur Darstellung der Definition der Einblendauflösung $\alpha_E$ eines Gauß-Profiles.....	162
Abbildung 7.8:	Skizze zur Darstellung der Definition der Einblendauflösung $\alpha_E$ eines Top-Profiles.....	162
Abbildung 7.9:	Übersichtsbild zur Visualisierung der Anordnung der Laserdioden bei einem eindimensionalen Mikrospiegelsystem.....	164
Abbildung 7.10:	Darstellung des normalisierten, idealisierten vertikalen Lichtstärkeprofils.....	166

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 7.11:	Simulierte Graustufendarstellung der überlagerten Laserspots in vertikaler Richtung.....	166
Abbildung 7.12:	Darstellung der simulierten Lichtstrommatrix des dynamischen Laserspots; Funktion 1.....	167
Abbildung 7.13:	Darstellung der simulierten Lichtstrommatrix des blendfreien Fernlichts; Funktion 2.....	167
Abbildung 7.14:	Darstellung der simulierten Lichtstrommatrix des Markierungslichts; Funktion 3.....	168
Abbildung 7.15:	Darstellung des Mikrospiegels.....	177
Abbildung 7.16:	Darstellung der normalisierten Aufenthaltszeit in Abhängigkeit des Auslenkwinkels $\alpha_{RS}$ .....	180
Abbildung 7.17:	Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 1.....	181
Abbildung 7.18:	Darstellung der Lichtverteilung 1.....	181
Abbildung 7.19:	Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 2.....	182
Abbildung 7.20:	Darstellung der Lichtverteilung 2.....	182
Abbildung 7.21:	Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 3.....	183
Abbildung 7.22:	Darstellung der Lichtverteilung 3.....	183
Abbildung 7.23:	Darstellung der optimierten normalisierten Aufenthaltszeit in Abhängigkeit des Auslenkwinkels $\alpha_{RS}$ .....	186

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 7.24:	Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 1. ....	188
Abbildung 7.25:	Darstellung der Lichtverteilung 1. ....	188
Abbildung 7.26:	Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 2. ....	189
Abbildung 7.27:	Darstellung der Lichtverteilung 2. ....	189
Abbildung 7.28:	Optische Leistungen der Laserdiode für die Lichtfunktion 3. ....	190
Abbildung 7.29:	Darstellung der Lichtverteilung 3. ....	190
Abbildung B.1:	Draufsicht auf eine Standardstraße und ein Standardfahrzeug. ....	253
Abbildung B.2:	Seitenansicht eines Standardfahrzeugs. ....	253
Abbildung B.3:	Horizontale Winkelbezeichnungen für den linken und rechten Scheinwerfer. ....	254
Abbildung B.4:	Vertikale Winkelbezeichnung des linken Scheinwerfers. ....	255
Abbildung B.5:	Vertikale Winkelbezeichnung des rechten Scheinwerfers. ....	255
Abbildung B.6:	Darstellung des horizontalen Schwenkwinkels. ....	255

---

## V TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1:	Vergleich zwischen zwei Technologien zur Erzeugung von weißem Licht.....	18
Tabelle 3.2:	Darstellung der Unterteilung von vier hochauflösenden Scheinwerfertechnologien in die Beleuchtungs-, Modulations- und Ansteuerungsart sowie in das Bilderzeugungsprinzip. ....	27
Tabelle 3.3:	Übersicht über LED Array Scheinwerfersysteme verschiedener Hersteller (Stand Juni 2016).....	33
Tabelle 4.1:	Übersicht über den Wirkungsgrad der Matrix-Scanner-Technologie [GUT16c]. ....	47
Tabelle 4.2:	Übersicht über den Wirkungsgrad der Matrix-DMD-Technologie [GUT16c]. ....	47
Tabelle 4.3:	Bewertungsmatrix zwischen der Matrix DMD und Matrix-Scanner-Technologie.....	48
Tabelle 4.4:	Darstellung der optische Leistungen und des Nutzungsgrads in Abhängigkeit der Technologie und der Betriebsart für Lichtfunktion 1 „Abblendlicht“, Lichtfunktion 2 „Abblend- und Fernlicht“, Lichtfunktion 3 „blendfreie Fernlicht“, Lichtfunktion 4 „Markierungslicht“ und Lichtfunktion 5 „adaptives Abblendlicht“.....	76

---

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 5.1:	Darstellung der Vorteile der Scheinwerfer- und HUD-Technologie. ....	85
Tabelle 5.2:	Schwenkwinkel von drei verschiedenen Betrachtungsfällen für den linken und rechten Scheinwerfer (HSW). ....	91
Tabelle 5.3:	Auswirkung der Schwenkrichtung auf den Ausleuchtbereich, die Ausleuchtüberlappung und den Projektionsabstand. ....	92
Tabelle 5.4:	Änderung des vertikalen Winkels bei einer Scheinwerferanbauhöhe $h_{Sch}$ von 0,65 m zwischen einem Kuppenradius von $r_{Kuppe} = 20.000$ m und $r_{Kuppe} = 1.000$ m. ....	98
Tabelle 5.5:	Änderung des vertikalen Winkels bei einer Scheinwerferanbauhöhe $h_{Sch}$ von 0,65 m zwischen einem Wannradius von $r_{Wanne} = 20.000$ m und $r_{Wanne} = 1.000$ m. ....	100
Tabelle 5.6:	Übersicht über die Radien von ausleuchtbaren Kurven in Abhängigkeit der Öffnungs- und Schwenkwinkel für den Fall 1 „keine Schwenkung“, für den Fall 2 „Schwenkung nach innen“ und den Fall 3 „Schwenkung nach außen“. ....	113
Tabelle 5.7:	Übersicht über die zur Ausleuchtung von Kurven benötigten Öffnungs- und Schwenkwinkel bei definierten Kurvenradien für den Fall 1 „keine Schwenkung“, für den Fall 2 „Schwenkung	



## Tabellenverzeichnis

---

	nach innen“ und den Fall 3 „Schwenkung nach außen“.....	114
Tabelle 5.8:	Nickwinkel beim Beschleunigen und Bremsen eines Fahrzeugs nach Huhn [HUH99].....	115
Tabelle 6.1:	Darstellung des Mittelwerte und der Standardabweichungen der Flimmerwahrnehmung für feine und grobe Pixel und zweier verschiedener Geschwindigkeiten.....	148
Tabelle 7.1:	Exemplarische Mikrospiegelparameter zur Berechnung der Mikrospiegelbeschleunigung.....	176
Tabelle 7.2:	Benötigte optische Leistungen pro Zeile in Abhängigkeit der Lichtfunktion 1 „dynamischer Laserspot“, Lichtfunktion 2 „dynamischer Laserspot mit Entblendung“ und Lichtfunktion 3 „dynamischer Laserspot mit Markierung“.....	184
Tabelle 7.3:	Benötigte optische Leistungen pro Zeile im optimierten Mikrospiegelbetrieb in Abhängigkeit der Lichtfunktion 1 „dynamischer Laserspot“, Lichtfunktion 2 „dynamischer Laserspot mit Entblendung“ und Lichtfunktion 3 „dynamischer Laserspot mit Markierung“.....	186
Tabelle 7.4:	Gegenüberstellung der benötigten optischen Leistungen und des Nutzungsgrads für die Lichtfunktion 1	

	„dynamischer Laserspot“, Lichtfunktion 2	
	„dynamischer Laserspot mit Entblendung“	
	und Lichtfunktion 3 „dynamischer	
	Laserspot mit Markierung“ .....	192
Tabelle C.1:	Darstellung der Ablaufreihenfolge der	
	Szenarien, Frequenzen und	
	Geschwindigkeiten.....	258

---

## VI ANHANG

# Anhang A: ABKÜRZUNGEN, SYMBOLE UND EINHEITEN

## A.1 ABKÜRZUNGEN

AFS	Adaptive Front-Lighting System
AMD	Analog Micromirror Device
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CPC	Cooperative Patent Classification
DMD	Digital Micromirror Device
FOD	Funktion on Demand
FVF	Flimmerverschmelzungsfrequenz
FWHM	Full Width at Half Maximum
iLaS	Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer
IPC	International Patent Classification
ISIT	Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
LDS	Lichtdrehshalter
LSP	Lichtschwerpunkt
LWR	Leuchtweitenregelung
LCD	Liquid-Crystal Display

---

HDG	Hell-Dunkel-Grenze
HSW	Hauptscheinwerfer
MOEMS	Mikro-Opto-Elektro-Mechanisches-System
MMI	Mensch-Maschine Interface
PSE	Perlschnureffekt
RGB	Rot Grün Blau
StVO	Straßenverkehrsordnung
UV	Ultraviolett
VoLiFa	Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung
VTD	Virtual Test Drive
WPE	Wall Plug Efficiency
YAG	Yttrium-Aluminium Granat

## A.2 SYMBOLE UND EINHEITEN

$a_{ij}$	Diskretisierte Pixelnummer mit dem Indizes $i$ und $j$
$a_{MEMS}$	Höhe eines Mikrospiegels
$A$	Matrix welche die An-Aus Verhältnissen der Pixel $a_{ij}$ enthält
$A_{Leiter}$	Querschnittsfläche des elektrischen Leiters auf einem Mikrospiegel
$\alpha$	Signifikanzniveau
$\alpha_A$	Horizontale Ausblendauflösung (Vollwinkel) eines Scheinwerfers
$\alpha_d$	Horizontaler Öffnungswinkel (Vollwinkel) eines Scheinwerfers
$\alpha_E$	Horizontale Einblendauflösung (Vollwinkel) eines

	Scheinwerfers
$\alpha_G$	Sende- oder Empfangswinkel (Halbwinkel) für die Etendue Berechnung
$\alpha_i$	Winkel einer korrespondierenden horizontalen Bildebene-Koordinate $u_i$
$\alpha_{LS}$	Horizontaler Winkel des linken Scheinwerfers
$\alpha_{LSl}$	Horizontaler Winkel zwischen der senkrechten zur Fahrzeugachse und dem linken Ausleuchtbereich
$\alpha_{LSr}$	Horizontaler Winkel zwischen der senkrechten zur Fahrzeugachse und dem rechten Ausleuchtbereich
$\alpha_{MEMS}$	Auslenkwinkel eines Mikrospiegels
$\dot{\alpha}_{MEMS\ Real}$	Mikrospiegelbeschleunigung auf Basis von Mikrospiegelparametern
$\alpha_{RS}$	Horizontaler Winkel des rechten Scheinwerfers
$\alpha_{Res}$	Horizontale Diskretisierungsauflösung (Vollwinkel)
$b_{MEMS}$	Breite eines Mikrospiegels
$B$	Magnetische Flussdichte
$\beta_A$	Vertikale Ausblendauflösung (Vollwinkel) eines Scheinwerfers
$\beta_d$	Vertikaler Öffnungswinkel (Vollwinkel) eines Scheinwerfers
$\beta_E$	Vertikale Einblendauflösung (Vollwinkel) eines Scheinwerfers
$\beta_{HDG}$	Vertikaler Winkel zur Ausleuchtung einer Straße im gesetzlichen Abstand
$\beta_i$	Winkel einer korrespondierenden vertikalen Bildebene-Koordinate $v_i$
$\beta_{LS}$	Vertikaler Winkel des linken Scheinwerfers

$\beta_{\max}$	Maximale Winkelveränderung beim Beschleunigen oder Bremsen eines Fahrzeugs
$\beta_{\text{PAb}}$	Vertikaler Winkel zum Ausleuchten der Straße im Abstand $l_{\text{PAb}}$
$\beta_{\text{PAb+Pro}}$	Vertikaler Winkel zum Ausleuchten der Straße im Abstand $l_{\text{PAb}} + l_{\text{Pro}}$
$\beta_{\text{RS}}$	Vertikaler Winkel des rechten Scheinwerfers
$\beta_{\text{Res}}$	Vertikale Diskretisierungsauflösung (Vollwinkel)
$b_{\text{Kfz}}$	Breite eines Kraftfahrzeugs
$b_{\text{Str}}$	Breite einer Straße
$b_{\text{Spur}}$	Breite einer Fahrspur
$c_{\text{MEMS}}$	Länge eines Mikrospiegels
$C$	Rückstellkraft der Feder eines Mikrospiegels
$d$	Standardisierte Differenz
$d_{\text{Sch}}$	Abstand des Lichtaustritts eines Scheinwerfers zur Fahrzeugaußenseite
$d_{\text{Str}}$	Abstand der Fahrzeugaußenseite zur Fahrspurmarkierung
$\Delta\beta$	Vertikale Differenz zwischen zwei Winkeln
$\gamma$	Betrag des Schwenkwinkels
$\gamma_{\text{L}}$	Skew Factor, welcher die Pixelgeometrie auf der Bildebene beschreibt
$\gamma_{\text{RS}}$	Schwenkwinkel des rechten Scheinwerfers
$\gamma_{\text{LS}}$	Schwenkwinkel des linken Scheinwerfers
$E_{\text{v}}$	Beleuchtungsstärke
$\varepsilon$	Winkelverkipfung zur Flächennormalen bei der Etendueberechnung
$\eta_{\text{WPE}}$	WPE der Laserdiode
$\eta_{\text{Sca\_Sys}}$	Systemwirkungsgrad der Matrix-Scanner-Technologie

$\eta_{\text{DMD\_Sys}}$	Systemwirkungsgrad der Matrix-DMD-Technologie
$f$	Abstand des Lochkamerakoordinaten-Ursprungs zur Bildebene
$f_{\alpha}$	Horizontale Scanfrequenz
$f_{\beta}$	Vertikale Scanfrequenz
$f_{\text{frame}}$	Pixel- oder Bildwiederholrate
$f_{\text{PSE}}$	Perlschnur Grenzfrequenz
$G$	Etendue
$G_{\text{Kon}}$	Etendue eines leuchtenden Bereichs auf einem Konverter
$G_{\text{Optik}}$	Etendue einer Optik
$G_{\text{Si}}$	Schubmodul von Silizium
$G_{2\text{D}}$	Zweidimensionale Etendue
$G_{3\text{D}}$	Dreidimensionale Etendue
$\theta_{\text{G}}$	Winkelverkipfung eines Lichtkegels gegen die Flächennormalen zur Berechnung der Etendue
$\theta_{ij}$	Winkel zwischen der Flächennormalen und einem Pixel $a_{ij}$
$\theta_{\text{Kuppe}}$	Winkel in einem Dreieck das in einem Kreis mit dem Radius einer Kuppe durch den Projektionsabstand $l_{\text{PAb}}$ aufgespannt wird
$h_{\text{Auge}}$	Augenhöhe eines Kraftfahrzeugfahrers
$h_{\text{Sch}}$	Anbauhöhe eines Scheinwerfers
$h'$	Höhendifferenz beim Durchfahren einer Kuppe oder Wanne im Abstand $l_{\text{PAb}}$
$i$	Zählindex vertikal
$I$	Lichtstärkematrix
$I_{ij}$	Lichtstärke eines Pixels $a_{ij}$

$I_{\max}$	Maximale Lichtstärke
$I_{\min}$	Minimale Lichtstärke
$I_v$	Lichtstärke
$I_{v\max}$	Gesetzlich festgelegte maximale Lichtstärke eines Fernlichts
$j$	Zähindex horizontal
$J$	Gesamträgheitsmoment einer Mikrospiegelbaugruppe
$K$	Intrinsischer Lochkameraparameter
$K_{\text{DMD}}$	Nutzungsgrad der Matrix-DMD-Technologie
$K_m$	Michelson Kontrast
$K_{\text{Sca}}$	Nutzungsgrad der Matrix-Scanner-Technologie
$l$	Ausdehnung der Lichtquelle
$l_{\text{LSRS}}$	Überlappungsentfernung
$l_{\text{LSRS}'}$	Entfernung bei Nichtüberlappung
$l_{\text{PAb}}$	Projektionsabstand zum Ego-Fahrzeug
$l_{\text{Pro}}$	Projektionslänge einer Abblendlichtfunktion
$l_1$	Leitungslänge senkrecht zur Achse eines Mikrospiegels
$l_2$	Leitungslänge parallel zur Achse eines Mikrospiegels
$L_m$	Mittlere Leuchtdichte
$L_{\text{Tor}}$	Länge eines Torsionsbalkens eines Mikrospiegels
$L_v$	Leuchtdichte
$m$	Anzahl an vertikalen Pixeln
$m_{\text{MEMS}}$	Masse eines Mikrospiegels
$M$	Drehmoment des bewegenden Teils eines Mikrospiegels
$\mu_{\alpha\text{RS}}$	Horizontaler Erwartungswert für die Berechnung der Spotprofils mit einer Normalverteilung
$\mu_{\beta\text{RS}}$	Vertikaler Erwartungswert für die Berechnung der Spotprofils mit einer Normalverteilung



$n$	Anzahl an horizontalen Pixeln
$n_B$	Brechungsindex
$n_P$	Größe einer Stichprobe
$n_{\text{Leiter}}$	Anzahl der Windungen
$O_c$	Ursprung der Lochkamerakoordinaten
$p$	Signifikanzwert
$P_{el}$	Elektrische Leistung
$p^{\text{Fit}}$	Vektor der an eine Gaußverteilung angepasste Werte enthält
$P_{\text{max}}$	Maximale optische Leistung
$P_{\text{mean}}$	Mittlere optische Leistung
$\Pi$	Extrinsische Lochkamera Parameter
$q_w$	Punkt einer Lichtverteilung in Weltkoordinaten
$Q_w$	Matrix, welche die Lichtverteilung in Weltkoordinaten enthält
$r$	Kurvenradius
$r_{\text{Kon}}$	Radius des leuchtenden Bereichs auf einem Konverter
$r_{\text{Kuppe}}$	Kuppenradius
$r_{\text{Optik}}$	Radius einer rotationssymmetrischen Optik
$r_{\text{Tor}}$	Radius eines Torsionsbalkens eines Mikrospiegels
$r_{\text{Wanne}}$	Wannenradius
$r_1$	Teillänge des Kurvenradius $r$ zur Berechnung des Öffnungswinkels
$r_2$	Teillänge des Kurvenradius $r$ zur Berechnung des Öffnungswinkels
$r_3$	Teillänge des Kurvenradius $r$ zur Berechnung des Öffnungswinkels
$R$	Konversionsrate

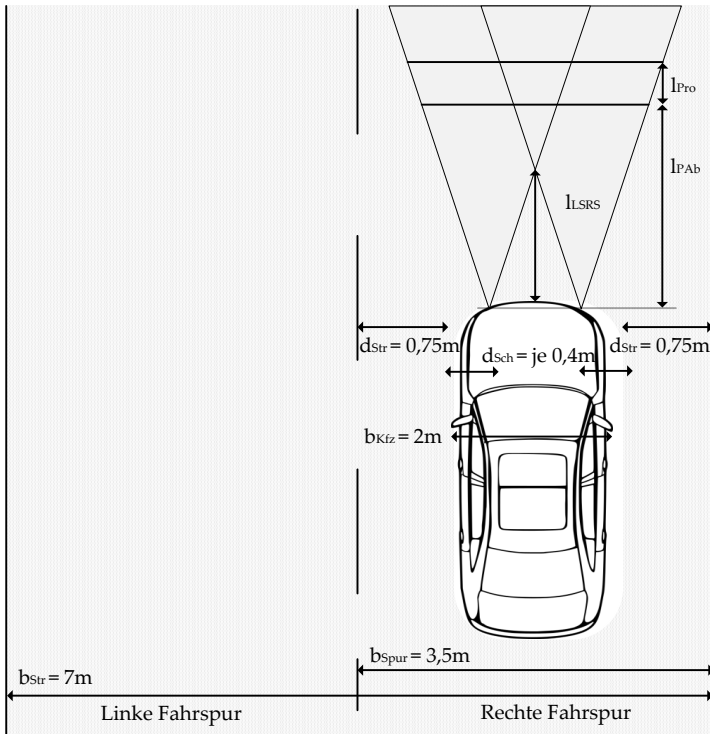
$R_L$	Rotationsparameter
$Q$	Spezifischer Widerstand
$\sigma$	Standardabweichung
$\sigma_{\alpha RS}$	Horizontale Standardabweichung für die Berechnung eines Spotprofils mit einer Normalverteilung
$\sigma_{\beta RS}$	Vertikale Standardabweichung für die Berechnung eines Spotprofils mit einer Normalverteilung
$\bar{\sigma}_f$	Standardabweichungen der Flimmerwahrnehmung von feinen Pixel
$\bar{\sigma}_g$	Standardabweichungen der Flimmerwahrnehmung von groben Pixel
$\sigma_{S1}$	Winkel zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Punkt $S_1$
$\sigma_{T1}$	Winkel zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Punkt $T_1$
$S_1$	Punkt auf Mittelspurmarkierung im senkrechten Abstand zum Ego Fahrzeug von $l_{PAB}$
$t$	Zeit
$t_{auf\_hor}$	Horizontaler Aufenthaltszeitvektor
$t_{auf\_ver}$	Vertikaler Aufenthaltszeitvektor
$t_{ij}$	Aufenthaltszeit in einem Pixel $a_{ij}$
$t_{frame}$	Zeit, welche für den Aufbau eines Frames benötigt wird
$t_L$	Translationsparameter
$t_{sum}$	Summe der Aufenthaltszeiten aller Pixel
$T$	Definierte Zeitdauer wie beispielsweise Periodendauer
$T_{auf}$	Aufenthaltszeitmatrix
$T_{auf\_2Dres}$	Aufenthaltszeitmatrix im resonanten 2D Betrieb
$T_{auf\_2DQua}$	Aufenthaltszeitmatrix im quasistatischen 2D Betrieb
$T_{auf\_res/qua}$	Aufenthaltszeitmatrix im resonant / quasistatischem Betrieb

$T_1$	Punkt auf Mittelspurmarkierung im senkrechten Abstand zum Ego Fahrzeug von $l_{PAb} + l_{Pro}$
$u$	Horizontale Bildebene-Koordinate
$U$	Spannung
$v$	Vertikale Bildebene-Koordinate
$\phi_{max}$	Lichtstromvektor der die maximalen Werte einer Lichtstrommatrix enthält.
$\Phi$	Lichtstrommatrix
$\Phi_{ij}$	Lichtstrom eines Pixels $a_{ij}$
$\Phi_{max}$	Maximaler Wert einer Lichtstrommatrix
$\Phi_{sum}$	Summer der Lichtstromwerte aller Pixel $a_{ij}$
$\Phi_v$	Lichtstrom
$x$	Horizontaler Positionswert in Grad an Wand betrachtet
$\bar{x}_f$	Mittelwert der Flimmerwahrnehmung von feinen Pixeln
$\bar{x}_g$	Mittelwert der Flimmerwahrnehmung von groben Pixeln
$x_{max}$	Maximale Leuchtreichweite eines Fernlichts
$\Psi_{Auge}$	Auflösungsvermögen eines Auges
$y$	Vertikaler Positionswert in Grad an Wand betrachtet
$\Omega$	Raumwinkelmatrix
$\Omega_{ij}$	Raumwinkel eines Pixels $a_{ij}$
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

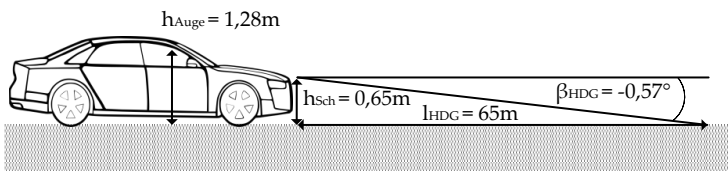
# Anhang B: DIMENSIONEN UND WINKEL

## B.1 STANDARDSTRAÙE UND STANDARDFAHRZEUG

In der Abbildung B.1 ist die Draufsicht und in der Abbildung B.2 die Seitenansicht auf ein Standardfahrzeug und eine StandardstraÙe zu sehen. Die Werte für die Breite des Fahrzeugs  $b_{KFZ}$ , der Anbauhöhe des Scheinwerfers  $h_{Sch}$ , der Spur  $b_{Spur}$ , der StraÙe  $b_{Str}$  und dem sich daraus ergebenden Abstand zur Mittelspurmarkierung und Straßenrand  $d_{Str}$ , wurde der Arbeit von Manz entnommen [MAN07]. Der Abstand zwischen dem Scheinwerfer zum Fahrzeugrand  $d_{Sch}$  basiert auf der ECE Regelung Nr. 48 [WIR06]. Die Augenhöhe  $h_{Auge}$  ist in der Arbeit von Hummel [HUM10] zu finden.



**Abbildung B.1:** Draufsicht auf eine Standardstraße und ein Standardfahrzeug.

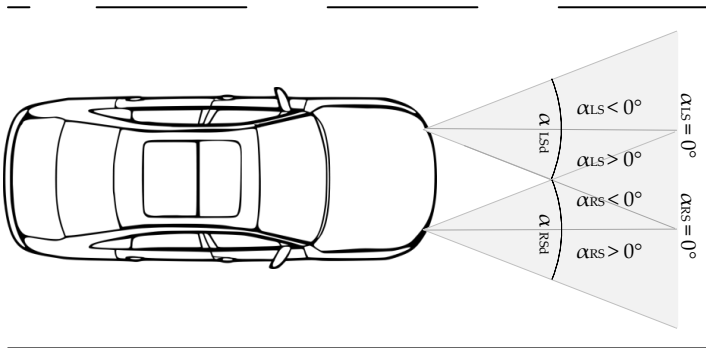


**Abbildung B.2:** Seitenansicht eines Standardfahrzeugs.

## B.2 WINKELBEZEICHNUNGEN

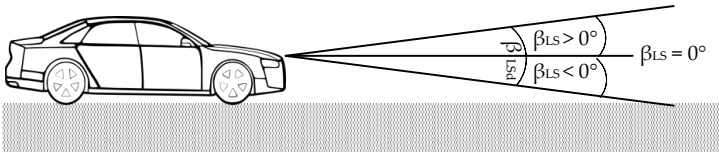
Die horizontale Winkelbezeichnungen haben, gemäß Abbildung B.3, den griechischen Buchstaben  $\alpha$  und die vertikalen Winkelbezeichnungen den Buchstaben  $\beta$ . Der rechte und linke Scheinwerfer unterscheiden sich durch den Index RS und LS.

Der Öffnungswinkel, wobei hier der Vollwinkel betrachtet wird, trägt den zusätzlichen Index d. Wenn die Beträge des Öffnungswinkels zwischen linken und rechten Scheinwerfer gleich sind gilt  $\alpha_{LSd} = \alpha_{RSd} = \alpha_d$  sowie für  $\beta_{LSd} = \beta_{RSd} = \beta_d$ .

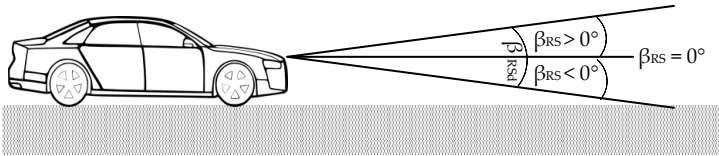


**Abbildung B.3:** Horizontale Winkelbezeichnungen für den linken und rechten Scheinwerfer.

Die vertikalen Winkelbezeichnungen für den linken und rechten Scheinwerfer können der Abbildung B.4 und Abbildung B.5 entnommen werden.

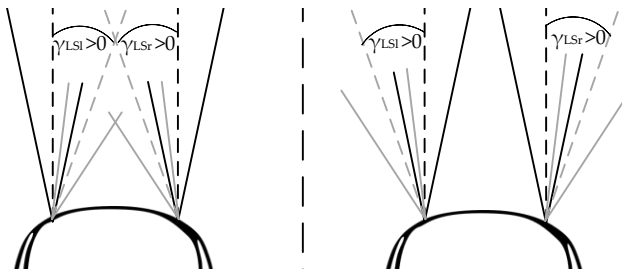


**Abbildung B.4:** Vertikale Winkelbezeichnung des linken Scheinwerfers.



**Abbildung B.5:** Vertikale Winkelbezeichnung des rechten Scheinwerfers.

Die Bezeichnung der Schwenkwinkel sind in der Abbildung B.6 dargestellt.



**Abbildung B.6:** Darstellung des horizontalen Schwenkwinkels.

# Anhang C: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

## C.1 FRAGEBÖGEN

Im folgenden Kapitel ist der Inhalt der Fragebögen aus Kapitel 6 zu finden. Aus Platzgründen wird auf die grafische Darstellung der Bewertungsskalen und Antwortmöglichkeiten verzichtet.

### **Allgemeine Vorbefragung:**

-Geschlecht (*Männlich / Weiblich*)

-Wie alt sind Sie (*Jahre*)

-Haben Sie eine Sehhilfe (*nein / ja manchmal / ja ständig*)

-Wenn Sie mit *ja* geantwortet haben: Welche Art von Sehschwäche haben Sie? (*Kurzsichtigkeit / Weitsichtigkeit / Offene Frage: Dioptrien*)

-Wurde bei Ihnen eine Sehschwäche diagnostiziert oder behandelt wie beispielsweise ein operatives Lasern der Augen? (*Offene Frage*)

-Wie lange haben Sie Ihren Führerschein? (*Offene Frage*)

-Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich pro Jahr? (*Offene Frage*)



-Wie erfahren fühlen Sie sich selbst als Fahrer? (*Skala von „sehr erfahren“ bis „sehr unerfahren“*)

-Wie heißt der Hersteller von dem Fahrzeug, welches Sie momentan hauptsächlich nutzen? (*Offene Frage*)

-Welche Art von Scheinwerfer ist in Ihrem aktuellen Fahrzeug vorhanden? (*Offene Frage*)

-Wie häufig fahren Sie bei Dunkelheit? (*täglich / mehrmals pro Woche / 1 mal pro Woche / 1 mal pro Monat / nie*)

### **Fragebogen für Versuchsdurchführung:**

#### **Szenario 1**

-Haben Sie ein Flimmern wahrgenommen? (*Ratingskala von ++ „stimme vollkommen zu“ bis -- „stimme überhaupt nicht zu“*)

#### **Szenario 2a, 2b und Szenario 3**

-Haben Sie ein Flimmern wahrgenommen und wenn ja wie stark? (*Ratingskala von ++++ „sehr stark“ über +++ „stark“, ++ „mittel“, + „leicht“ bis 0 „gar nicht“*)

-Mit der gefahrenen Geschwindigkeit habe ich mich sicher gefühlt (*Ratingskala von ++ „stimme vollkommen zu“ bis -- „stimme überhaupt nicht zu“*)

**C.2 ABLAUFREIHEFOLGE**

**Tabelle C.1:** Darstellung der Ablaufreihenfolge der Szenarien, Frequenzen und Geschwindigkeiten.

<b>Thema</b>	<b>Ablauf</b>	<b>Code</b>
Tausch der Szenarien 2 und 3	1. Szenario 2	H1L2
	2. Szenario 3	
	1. Szenario 3	H2L1
	2. Szenario 2	
Tausch innerhalb von Szenario 2	1. Szenario 2b	PXFQ
	2. Szenario 2a	
	1. Szenario 2a	FQPX
	2. Szenario 2b	
Tausch innerhalb von Szenario 2b	1. Pixelgröße fein	PXFG
	2. Pixelgröße grob	
	1. Pixelgröße grob	PXGF
	2. Pixelgröße fein	
Geschwindigkeitsdarbietung innerhalb von Szenario 2 und 3	-Aufsteigende Geschwindigkeiten in Szenario 2 -Absteigende Geschwindigkeiten in Szenario 3	SPAD

---

## Anhang

---

-Absteigende Geschwindigkeiten in Szenario 2  
-Aufsteigende Geschwindigkeiten in Szenario 3

SPDA

---

Frequenzdarbietung innerhalb von Szenario 2 und 3

-Aufsteigende Frequenzen in Szenario 2  
-Absteigende Frequenzen in Szenario 3

FQAD

-Absteigende Frequenzen in Szenario 2  
-Aufsteigende Frequenzen in Szenario 3

FQDA

---

## Anhang D: VERÖFFENTLICHUNGEN

### D.1 KONFERENZBEITRÄGE

**Gut, C.; Rotscholl, I.; Neumann, C.**

Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Karlsruhe: 2014.

**Gut, C.; Huhn, W.**

A Safety Concept for Laser Headlamps. In: Fudan University (Hrsg.). The 2nd International Forum on Automotive Lighting IFAL: Tagungsband. Shanghai: 2014.

**Gut, C.; Berlitz, S.**

Laser headlamp. Experiences in motor sports for series development. In: Société des Ingénieurs de l'Automobile (Hrsg.). Vision 2014: Tagungsband. Versailles: 2014.

**Gut, C.:**

Von der LED zum Laser: Erste Scheinwerferanwendungen mit konvertierter Laserstrahlung. In: Haus der Technik. 11. Tagung LED in der Lichttechnik. Essen: 2015.

**Gut, C.; Petersen, A.; Jahn, P.; Seitz, M.; Neumann, C.; Berlitz, S.**

Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). ELIV - Kongress zur Fahrzeug-elektronik: Tagungsband. Baden-Baden: 2015.

**Huhn, W.; Gut, C.; Omerbegovic, S.; Haug, T.; Funk, C.**

The advanced ADB system of the new Audi Q7. In: Fudan University (Hrsg.). The 3rd International Forum on Automotive Lighting IFAL: Tagungsband. Kunshan: 2015.

**Wilhelmy, J.; Gut, C.**

Laser Headlamps. Key factors and improvement. In: T. Q. Khanh (Hrsg.). 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. Darmstadt: 2015.

**Petersen, A.; Hager, J.; Gut, C.; Jahn, P.; Seitz, M.; Schwaiger, S. et al.**

Challenges for MEMS based Scanning Laser System. In: T. Q. Khanh (Hrsg.): 11th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. Darmstadt: 2015.

**Gut, C.; Vargas, J.; Berlitz, S.; Neumann, C.**

Neuartige Lichtfunktionen auf Basis hochaufgelöster Scheinwerfer-systeme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technolo-gien in der Fahrzeugtechnik: Tagungsband. Karlsruhe: 2016.

## **D.2 ZEITSCHRIFTEN UND JOURNALS**

**Berlitz, S.; Gut, C.; Krstajic, V.**

Laserscheinwerfer. Vom Motorsport zur Serie. In: Elektronik automotive (2014) Nr.10.

**Fries, B.; Gut, C.; Laudенbach, T.; Mühlmeier, M.**

Laser Light for the Audi R18 e-tron quattro Racing Car. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 116 (2015) Nr.6.

**Gut, C.; Cristea, I.; Neumann, C.**

High-resolution headlamp. In: Advanced Optical Technologies 5 (2016) Nr. 2.

## **D.3 PATENTSCHRIFTEN**

**Gut, C.**

Beleuchten einer Fahrzeugumgebung. Offenlegungsschrift. Audi AG. Angemeldet durch Audi AG. Anmeldedatum: 20.12.2013. Veröffentlichungsnr: DE102013021941A1.

**Gut, C.; Wilhelmy, J.**

Beleuchtungseinrichtung für ein Kraftfahrzeug und Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 02.10.2013. Veröffentlichungsnr: DE10201316423A1.

**Gut, C.; Wilhelmy, J.**

Verfahren zum Betreiben einer Fahrerassistenzeinrichtung eines Kraftfahrzeugs sowie Fahrerassistenzeinrichtung. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 23.10.2013. Veröffentlichungsnr: DE102013017625A1.

**Gut, C.; Wilhelmy, J.**

System und Verfahren zum augensicheren Betreiben eines Fahrzeugscheinwerfers. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 20.12.2013. Veröffentlichungsnr: DE102013021942A1.

**Gut, C.**

System und Verfahren zum Steuern der Lichtverteilung eines laserbasierten Pixellichtsystems von wenigstens einer fahrzeugseitigen Scheinwerfereinrichtung. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 05.11.2014. Veröffentlichungsnr. DE102014016336 A1.

**Rotscholl, I.; Gut, C.; Nagy, P.**

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug mit zwei Typen von Leuchteinrichtungen. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 29.01.2014. Veröffentlichungsnr: DE102014001201A1.

**Rotscholl, I.; Gut, C.**

Verfahren zum Betreiben eines Scheinwerfers für ein Kraftfahrzeug sowie Scheinwerfer. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 31.01.2014. Veröffentlichungsnr: DE102014001299A1.

**Gut, C.; Funk, C.**

Leuchtweitenregulierung für einen Kraftfahrzeug-Scheinwerfer. Offenlegungsschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 12.06.2014. Veröffentlichungsnr: DE102014008743A1.

**Wilhelmy, J.; Gut, C.**

Scheinwerfer für ein Kraftwagen sowie ein Kraftwagen. Patentschrift. Audi AG. Anmeldedatum: 06.09.2014. Veröffentlichungsnr: DE102014013202B3.

**Gut, C.**

Verfahren zum Betreiben einer Scheinwerfereinrichtung sowie Scheinwerfereinrichtung eines Kraftfahrzeugs. Audi AG. Anmeldedatum: 29.04.2015. Anmeldenr. 102015005649.2.

**Gut, C.; Vargas, J.**

Dimmen einer Lichtquelle. Audi AG. Anmeldedatum: 04.03.2016. Anmeldenr. 102016002558.1.



## **Anhang E: BETREUTE STUDENTISCHE ARBEITEN**

### **Flammersberger, G.**

Potential eines RGB-Lasers als Frontscheinwerfersystem im Automobil. Ingolstadt, Technische Hochschule. Bachelorarbeit. 2014.

### **Michel, K.**

Segmenteinteilung eines mehrzeiligen blendfreien Fernlichts. Zwickau, Westsächsische Hochschule Zwickau. Diplomarbeit. 2014.

### **Muck, C.**

Sicherheitsbetrachtung laserbasierter Weißlichtquellen. Regensburg, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg. Bachelorarbeit. 2014.

### **Koch, F.**

Konzeptionierung sowie Modifikation eines LED-Pixel-Scheinwerfers zur experimentellen Analyse strahlgeführter dynamischer Laserlichtsysteme. Darmstadt, Hochschule Darmstadt. Masterarbeit. 2015.

**Behr, R.**

Ausführung und Evaluierung einer Probandenstudie zur Bestimmung der Flimmerfrequenz eines mehrzeiligen Pixelscheinwerfers. Ingolstadt, Technische Hochschule Ingolstadt. Bachelorarbeit. 2015.

**Alliger, C.**

Analyse und Benchmarking von Mikro-Opto-Elektro-Mechanischen Systemen. Darmstadt, TU Darmstadt. Bachelorarbeit. 2015.

**Deppisch, U.**

Benchmark von flächenmodulierten und strahlgeführten Scheinwerfersystemen. Wiesbaden Rüsselsheim, Hochschule RheinMain. Masterarbeit. 2015.

**Träger, N.**

Auflösungsanforderungen hochauflösender Pixellichtsysteme. Aalen, Hochschule Aalen. Bachelorarbeit. 2015.

**Ivkovic, M.**

Integration eines Mikrospiegelmoduls in einen Matrix-LED-Scheinwerfer. München, Hochschule für angewandte Wissenschaften München. Bachelorarbeit. 2016.

**Vargas, J**

Optical requirements for high resolution headlights. Jena, Friedrich-Schiller-Universität Jena. Masterarbeit. 2016.