

# TECHNOLOGISCHE UND PHYSIOLOGISCHE BEWERTUNG DYNAMISCHER PROJEKTIONS- SYSTEME IM AUTOMOBIL

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

M. Sc. Christopher Bremer

geb. in	Wilhelmshaven
Tag der mündlichen Prüfung:	25. November 2021
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer



---

## I DANKSAGUNG

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Lichtsysteme Exterieur bei der BMW AG.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann der mir stets mit fachlichem Rat zur Seite stand sowie moralisch unterstützend das Gelingen dieser Arbeit überhaupt ermöglicht hat.

Ein weiterer Dank geht an meinen persönlichen Betreuer Burkhard Lewerich sowie den anderen Kollegen der BMW AG, welche ständig mit anregenden Diskussionen zur Verfügung standen. Hervorzuheben sind hier Thomas Hausmann, der es mir ermöglicht hat, die Dissertation in der Abteilung Lichtsysteme Exterieur zu schreiben sowie Christian Jebas, welcher stets mit Freude das breite Spektrum unterschiedlicher lichttechnischer Themen diskutierte.

Ein besonderer Dank geht auch an meine Familie und an meine Freundin Fabienne, die es stets schafften mich in richtigem Maße zu unterstützen und zu motivieren.

---

## II INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung.....	1
II	Inhaltsverzeichnis .....	2
	<b>Kapitel 1.....</b>	<b>5</b>
	<b>Motivation und Ziele der Arbeit.....</b>	<b>5</b>
	1.1 Erweiterung der Lichtfunktionen durch Projektionen .....	5
	1.2 Ziel der Arbeit.....	8
	1.3 Aufbau der Arbeit .....	9
	<b>Kapitel 2.....</b>	<b>11</b>
	<b>Projektionen im Automobil – Stand der Technik.....</b>	<b>11</b>
	2.1 Patentanmeldungen und Veröffentlichungen zu Projektionstechnologien im Fahrzeug .....	12
	2.2 In Serie implementierte Systeme.....	18
	2.3 Fazit.....	21
	<b>Kapitel 3.....</b>	<b>22</b>
	<b>Anforderungen für eine Integration kleiner Projektoren im Fahrzeug.....</b>	<b>22</b>
	3.1 Größe des Projektionsfeldes.....	25
	3.2 Auflösung des Projektionsfeldes.....	29
	3.3 Erforderliche Beleuchtungsstärken.....	35

3.4	Bauraum.....	39
3.5	Farbe der Projektion .....	42
3.6	Flimmerverschmelzungsfrequenz / Regenbogeneffekt .....	43
3.7	Kontrast, Graustufen und Schwarzwert.....	44
3.8	Augensicherheit .....	46
3.9	Thermische Eigenschaften.....	47
3.10	Zusammenfassung der Anforderungen .....	49
<b>Kapitel 4</b>	.....	<b>54</b>
<b>Technologische Einschränkungen durch physiologische Rahmenbedingungen .....</b>		<b>54</b>
4.1	Augensicherheit .....	54
4.2	Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes.....	77
<b>Kapitel 5</b>	.....	<b>83</b>
<b>Die Straße als Projektionsfläche für polarisiertes Licht.....</b>		<b>83</b>
5.1	Studie zur Polarisation.....	85
<b>Kapitel 6</b>	.....	<b>92</b>
<b>Evaluation kleiner Projektionssysteme und Auswahl geeigneter Konzepte .....</b>		<b>92</b>
6.1	Effizienz- und Bauraumuntersuchung .....	93
6.2	Thermische Rahmenbedingungen .....	132
6.3	Auflösungsvermögen verschiedener Projektionssysteme .....	143
6.4	Auswahl der Systeme.....	165

<b>Kapitel 7</b> .....	172
<b>Prototypische Umsetzung, Analyse und Bewertung im Anwendungsfall</b> .....	172
7.1    LED-LCoS.....	172
7.2    LED-DMD .....	184
7.3    RGB-Laser LCoS .....	195
<b>Kapitel 8</b> .....	202
<b>Fazit und Ausblick</b> .....	202
8.1    Zusammenfassung und Fazit .....	202
8.2    Ausblick .....	206
<b>III Abbildungsverzeichnis</b> .....	208
<b>IV Tabellenverzeichnis</b> .....	219
<b>V Anhang</b> .....	226
<b>Anhang A:    Abkürzungen &amp; Symbole</b> .....	226
<b>Anhang B:    Weiterer Anhang</b> .....	232
<b>Anhang C:    Veröffentlichungen und     Patentanmeldungen</b> .....	276
<b>VI Literaturangaben</b> .....	281

## Kapitel 1

# MOTIVATION UND ZIELE DER ARBEIT

### 1.1 ERWEITERUNG DER LICHTFUNKTIONEN DURCH PROJEKTIONEN

Durch Projektionen in den Bereich um ein Fahrzeug ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für neuartige Lichtfunktionen. Prominente Beispiele für diese Erweiterung der Funktionen sind Designinszenierungen und projizierte Blinker zur Erhöhung der Sicherheit [1].

Eine Vorstufe zu hochauflösenden Projektionen wird durch Matrix-LED-Systeme realisiert. Durch diese ist eine blendfreie Ausleuchtung des Verkehrsraums möglich. Dabei ist die Zahl der ansteuerbaren Segmente auf aktuell 84 gestiegen [2]. Weiterentwicklungen streben eine vielfach höhere Auflösung an. Beispielhaft sind hier die  $\mu$ LEDs, scannende Laser oder Systeme mit Flächenlichtmodulatoren zu nennen [3, 4].

Durch die Erweiterung des Scheinwerfers mit einem Digital Micro-mirror Device (DMD) können dynamische Projektionen mit einer ho-

hen Auflösung realisiert werden [5]. Neben einer präzisen Ausleuchtung des Verkehrsraumes sind DMD-Systeme ebenso in der Lage, Symbole auf die Fahrbahn zu projizieren. Projektionen aus dem Scheinwerfer können demnach Fahrer in doppelter Hinsicht unterstützen: Neben der optimalen Ausleuchtung der Fahrbahn kann der Fahrer durch die Projektion von Symbolen oder Hilfslinien unterstützt werden [5].

Um das Fahrzeug zu inszenieren, werden Grafiken oder Logos in das direkte Umfeld des Fahrzeuges projiziert. Eine einfache Variante ist durch einen Einkanalprojektor gegeben, welcher beispielsweise ein Logo auf die Straße projiziert. Der Anbauort befindet sich hierbei in vielen Fällen im Seitenspiegel, wodurch sich eine (fast) senkrechte Projektion auf die Straße realisieren lässt. Eine weitere Variante ermöglicht die Projektion von Grafiken aus dem Schweller des Fahrzeuges mit einem sogenannten MLA (Mikrolinsenarray) [6]. Durch dieses können qualitativ hochwertige (statische) Projektionen aus kleinen Bauräumen realisiert werden. Eine Weiterentwicklung ist ein komplett dynamisches Projektionsfeld, welches animierte Grafiken, Interaktionsfelder oder personalisierten Inhalt darstellt. Viele dieser Ideen wurden bereits in Konzeptfahrzeugen gezeigt [7].

Neben der aktuellen Verwendung von Projektoren zur Inszenierung des Fahrzeuges gibt es verschiedene Ideen für weitere Einsatzmöglichkeiten von Projektionen. Durch die Erweiterung des Blinkers mit einer Projektion kann sich (insbesondere bei Nacht) die Sicherheit im



Straßenverkehr erhöhen. Wenn die Projektion zusätzlich eine Dynamik vorweist, wird die Wahrnehmbarkeit dieser Projektionen weiter erhöht [1].

Durch die Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme hin zum hochautomatisierten und vollautomatisierten Fahren (HAF und VAF) ergeben sich darüber hinaus neue Anwendungsfälle im Straßenverkehr. Eine Kommunikation zwischen Fahrzeugführer und Fußgänger über Gesten etc. ist bei autonomen Fahrzeugen in den meisten Fällen nicht sinnvoll. Als Ersatzszenario könnten neben Displays im Exterieur eines Fahrzeuges Projektionen auf der Straße eingesetzt werden [8].

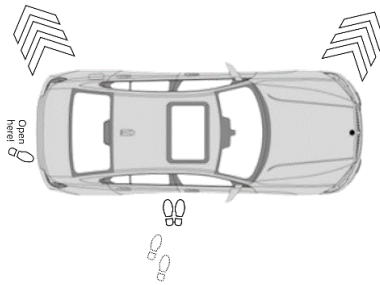
Es ist ersichtlich, dass es in den verschiedenen Bereichen

- *Projektion zur Unterstützung des Fahrers*
- *Inszenierung des Fahrzeuges*
- *Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern durch Projektionen*

eine Vielzahl von Ideen und Anwendungen gibt, die durch neue Technologien im Fahrzeug realisiert werden können. Eine tiefere Analyse der unterschiedlichen Anwendungen und der bereits geleisteten Arbeit in diesem Umfeld ist in Kapitel 2 zu finden.

## 1.2 ZIEL DER ARBEIT

In dieser Arbeit sollen die unterschiedlichen Konzepte / Technologien hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten für Projektionen im automobilen Sektor bewertet werden. Beispielhafte Anwendungen sind in **Abbildung 1.1** dargestellt.



**Abbildung 1.1:** Visualisierung verschiedener Ideen von Projektionen in das Umfeld des Fahrzeuges.

Um diese Bewertung zu ermöglichen, werden die Anwendungen klassifiziert und aus diesen Anforderungen abgeleitet. Weiterhin werden physiologische Limitierungen (Augensicherheit, Flimmerverschmelzungsfrequenz) sowie äußere Einflüsse (Straße als Projektionsfläche) betrachtet und in die Bewertung der verschiedenen Systeme eingebracht.

Für die technologische Bewertung wird neben der theoretischen Analyse eine prototypische Umsetzung unterschiedlicher Konzepte durchgeführt. Somit können anwendungsabhängig Empfehlungen für einen Serieneinsatz im Automobil abgegeben werden.

### 1.3 AUFBAU DER ARBEIT

Der Inhalt der Arbeit ist in **Abbildung 1.2** visuell dargestellt. Das erste Kapitel befasst sich mit der Motivation, der Zielsetzung und dem Aufbau der Arbeit. Im zweiten Kapitel wird auf den Stand der Technik eingegangen. Die notwendige Definition der Anforderungen für die verschiedenen Anwendungsfälle erfolgt in Kapitel 3 . Die technologischen Einschränkungen, welche sich durch physiologische Rahmenbedingungen ergeben, werden in Kapitel 4 untersucht. Darunter fällt die Betrachtung der Augensicherheit sowie die Bewertung der Flimmerverschmelzungsfrequenz und des Regenbogeneffektes. Weiterhin wird der Einfluss der Straße als Projektionshintergrund, insbesondere Effekte, welche durch polarisiertes Licht entstehen, analysiert (Kapitel 5 ). Im darauffolgenden Abschnitt (Kapitel 6 werden zunächst Einzelkomponenten möglicher Projektionstechnologien und schließlich das Gesamtsystem bewertet, um Konzepte für einen prototypischen Aufbau zu wählen. Die Evaluation der unterschiedlichen Prototypen geschieht in Kapitel 7 . Im letzten Kapitel wird das Fazit gezogen und ein Ausblick über die Möglichkeiten der Projektionen in das Umfeld des Fahrzeuges gegeben.

Kapitel 1	Motivation und Ziele	
Kapitel 2	Stand der Technik	
Kapitel 3	Herleitung der Anforderungen	
Kapitel 4	Physiologische Rahmenbedingungen	
Kapitel 5	Straße als Projektionsfläche	
Kapitel 6	Evaluation der Projektionssysteme	
Kapitel 7	Aufbau und Bewertung von Prototypen	
Kapitel 8	Ausblick und Fazit	

**Abbildung 1.2:** Inhalt der Arbeit (für eine bessere Lesbarkeit wurden die Titel der Kapitel gekürzt).

## Kapitel 2

# PROJEKTIONEN IM AUTOMOBIL – STAND DER TECHNIK

Im ersten Kapitel wurde die erhöhte Nachfrage nach dynamischen Projektionen im Fahrzeug beschrieben und einige Beispiele hierfür aufgezeigt. Ein detaillierter Überblick über die Patentsituation sowie die auf dem Markt erhältlichen Technologien werden in diesem Kapitel dargestellt.

Ein Großteil der beschriebenen Ideen zielt darauf ab, Projektionsmodule in die Frontscheinwerfer eines Fahrzeuges zu integrieren und definierte Lichtverteilungen auf die Fahrbahn zu projizieren. Zu diesem Themenbereich existieren bereits eine Vielzahl an Untersuchungen, wie in 2.1.1 beschrieben wird. Dieser Bereich liegt somit nicht im Fokus dieser Arbeit.

Neben den Projektionen, die den Fahrer unterstützen, existieren vielfältige Ideen für Projektionen in das direkte Umfeld des Fahrzeuges (**Abbildung 1.1** und Abschnitt 2.1.2) mit unterschiedlichsten Anwendungsfällen. Für die Realisierung dieser Projektionen müssen die un-

terschiedlichsten Bauräume in Betracht gezogen werden. Bereits realisierte Bauräume für Umfeldprojektionen sind der Schweller und der Außenspiegel.

## 2.1 PATENTANMELDUNGEN UND VERÖFFENTLICHUNGEN ZU PROJEKTIONSTECHNOLOGIEN IM FAHRZEUG

Die erhöhte Relevanz von hochauflösenden<sup>1</sup> Projektionssystemen zeigt sich unter anderem in der Anzahl der veröffentlichten Patentanmeldungen in den letzten Jahren. In **Abbildung 2.1** ist die Anzahl der Anmeldungen für Projektionen im Fahrzeug grafisch dargestellt. Die Eingrenzung der Patente wurde über die Patentklassifizierung „B60Q1“<sup>2</sup>, die Technologiewahl<sup>3</sup> sowie dem Zusatz „Projection“ durchgeführt (im Anhang B.1 Patentanalyse findet sich die Zahl der

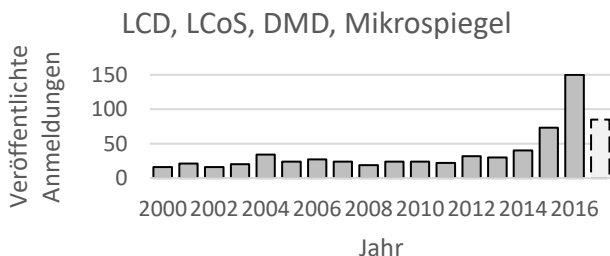
---

<sup>1</sup> Mit hochauflösend sind Projektionen gemeint, deren Substrukturen (z.B. einzelne Pixel) sich mit dem bloßen Auge nicht oder nur schwer auflösen lassen.

<sup>2</sup> Transport- Fahrzeuge allgemein- Anordnung von optischen Signal- oder Beleuchtungsvorrichtungen, deren Einbau oder Halterung sowie Schaltkreise hierzu

<sup>3</sup> DMD (Digital Micromirror Device), LCD (Liquid Crystal Device), LCoS (Liquid Crystal on Silicon), Micromirror, als prominenteste Beispiele für Display- oder Projektionstechnologien

veröffentlichten Anmeldungen aufgeschlüsselt nach den untersuchten Technologien).



**Abbildung 2.1:** Anmeldungen pro Jahr, welche unter der Patentklassifikation B60Q1 sowie unter den Schlagworten „LCD“, „LCoS“, „DMD“, „Micromirror“ und „Projection“ zu finden sind (für 2017 waren zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht alle Anmeldungen verfügbar).

Es ist deutlich zu erkennen, dass ab 2014 die Zahl der Anmeldungen in diesem Bereich stark steigt. Für 2017 waren zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht alle Daten verfügbar. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Zahl der veröffentlichten Anmeldungen für 2017 noch steigen wird. Der starke Anstieg zwischen 2014 und 2016 zeigt die Dynamik und die Relevanz des Themas für die Automobilindustrie.

Eine große Zahl an Patenten beschäftigt sich mit neuen Möglichkeiten für die Nutzung von Projektionen im Straßenverkehr. Die meisten Patente im Bereich der Projektionen lassen sich in folgende Kategorien einordnen:

- *Projektionen zur Unterstützung des Fahrers*
- *Kommunikation mit Teilnehmern aus dem Fahrzeugumfeld (Radfahrer, Fußgänger, andere Fahrzeugführer)*

### **2.1.1 PROJEKTIONEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DES FAHRERS**

In den letzten Jahren wurde bereits eine Vielzahl von hochauflösenden Projektionssystemen in unterschiedlichsten Beiträgen vorgestellt. Eine frühe prototypische Umsetzung eines Scheinwerfers, basierend auf einem DMD (Digital Micromirror Device), wurde durch Enders 2001 vorgestellt [9]. Ein Vergleich unterschiedlicher Scheinwerferkonzepte (DMD-, LCoS- (Liquid Crystal on Silicon) und konventioneller Projektionsscheinwerfer) wurde von Kauschke et al. [10] durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf den jeweiligen Wirkungsgrad des DMD-Konzeptes im Vergleich zu einem konventionellen System gelegt. Weiterführende Arbeiten stellen ein „Engstellenlicht“ als Anwendung solcher Systeme in Aussicht [11]. Die Auswirkungen dieser unterstützenden Funktionen werden in diversen Arbeiten evaluiert [12, 13]. Weitere Funktionen, welche durch ein DMD-System generiert werden können, sind in [5] beschrieben.



Die Möglichkeiten, die sich für LCD (Liquid Crystal Display)-Systeme ergeben, wurden von Willeke et al. untersucht [14]. Roth et al. evaluierten die Möglichkeit, scannende Lasersysteme im Scheinwerfer zu integrieren [8].

DE102016124933 beschreibt Lichtprojektoren zur visuellen Information für den Fahrzeugführer [15] und /oder anderer Verkehrsteilnehmer. Um projizierte Symbole adäquat für den Fahrer erscheinen zu lassen, wird in US2018086262 eine Methodik beschrieben, in welcher die Umgebung durch Sensorik erkannt wird und die Verzerrung der Projektion so geschieht, dass der Fahrer diese entzerrt wahrnehmen kann [16]. Neben grafischen Darstellungen, wie beispielsweise einem Warndreieck, können Haltelinien Inhalte solcher Projektionen sein, welche bei kreuzendem Verkehr warnen. Weiterhin können diese Linien bei sich im toten Winkel befindlichen Radfahrern oder entgegenkommendem Verkehr den Fahrer zum Halten auffordern, wie in DE102017202457 dargestellt [17]. In DE102006050546 wird beschrieben, wie über Projektionen Hinweise auf freie Parkflächen gegeben werden können [18]. Durch eine Projektion kann weiterhin auf das Bilden einer Rettungsgasse aufmerksam gemacht werden [19].

Neben der Projektion von hochauflösenden Elementen aus dem Scheinwerfer, beschäftigt sich eine Vielzahl von Ideen mit der Projektion rund um das Fahrzeug, wie zum Beispiel in EP3170698, US10160380, DE102018121914 oder DE102017117044 etc..

Die Projektionen zur Unterstützung des Fahrers werden dabei hauptsächlich mit Systemen generiert, die im Scheinwerfer verortet sind und bereits vielfach untersucht wurden.

### 2.1.2 KOMMUNIKATION MIT TEILNEHMERN AUS DEM FAHRZEUGUMFELD

Projektionen im Fahrzeugumfeld können auf verschiedenste Weise genutzt werden. Die Projektion unterschiedlicher Warnhinweise wird beispielhaft in EP3170698 [20] beschrieben. So soll eine Person im Umfeld eines Fahrzeuges beim Öffnen einer Tür durch eine Projektion gewarnt werden. Weiterhin wird die Situation eines rückwärts ausparkenden Fahrzeuges beschrieben. In diesem Fall kann eine Projektion die nächste Aktion des Fahrers / Fahrzeuges an die Umwelt kommunizieren und somit die Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer erhöhen. In KR101927060 [21] wird eine Projektion beschrieben, die einen Warnhinweis auf der Straße generiert, wenn eine Notbremsung durchgeführt wurde. Weiterhin eignen sich Projektionen als Anzeigestatus der Innentemperatur eines Fahrzeuges, wie in US10160380 [22] beschrieben. DE102018121914 [23] beschreibt einen Öffnungsmechanismus durch eine Irisdetektion des Fahrers am Fahrzeug. Damit dieser den korrekten Standpunkt vor dem Fahrzeug einnehmen kann, wird durch eine Projektionseinheit die für den Irisscan benötigte Position der Person, beispielsweise durch projizierte Fußabdrücke, markiert (siehe auch **Abbildung 1.1**). In DE202016004062

[24] wird ein Laserprojektionssystem beschrieben, welches im öffentlichen Nahverkehr eingesetzt werden kann, um Halte- oder Einstiegslinien zu generieren. In der Offenlegungsschrift DE102017117044 wird die Idee vorgestellt, ein Muster zu projizieren, welches den Bereich kennzeichnet, in dem ein Fahrzeug rangiert. Somit werden Sicherheitsbereiche um das Fahrzeug gekennzeichnet [25].

Eine Vielzahl von Patenten beschäftigt sich mit Projektionen im Umfeld des Fahrzeugs im Kontext autonom fahrender Vehikel. In DE102014011811 [26] wird ein Lichtmuster vorgeschlagen, welches den Verkehrsteilnehmern signalisiert, dass sich das Fahrzeug in einem vom Autopiloten gesteuerten Betriebsmodus befindet. Darüber hinaus soll die Projektion beispielsweise den geplanten Fahrweg anzeigen. Eine Visualisierung des Fahrzustandes wird ebenfalls in DE102016014709 [27] beschrieben. Durch ein Lichtmuster, welches in den umgebenden Bereich des Fahrzeuges projiziert wird, ergibt sich für die übrigen Verkehrsteilnehmer ein sichtbarer Bereich in der Nähe des Fahrzeuges, welcher gemieden werden sollte. Hierbei können Farbe wie auch Muster die unterschiedlichen Bereiche kennzeichnen. Auch US10053001 [28] schlägt eine Projektion als zusätzlichen Kommunikationskanal im autonomen Fahren vor. Hier sollen die nächsten Aktionen wie ein Abbiegen, ein Anhalten, ein Spurwechsel oder beispielhaft ein Ausparkmanöver kommuniziert werden. Eine Projektion eines Warnhinweises für ein autonom fahrendes Fahrzeug, welches defekt ist, wird in US2018186283 [29] beschrieben.

Auch eine Kommunikation durch Projektion zwischen zwei autonomen Fahrzeugen und einem dritten Verkehrsteilnehmer ist in der Offenlegungsschrift US2018257547 [30] beschrieben.

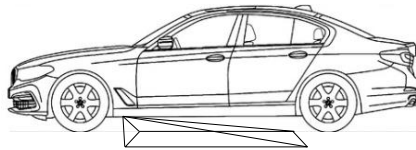
## 2.2 IN SERIE IMPLEMENTIERTE SYSTEME

Neben den hochauflösenden Projektionen aus dem Scheinwerfer zur Unterstützung des Fahrers sind hochauflösende statische Projektionen in das direkte Umfeld des Fahrzeuges (vgl. **Abbildung 1.1**) bereits in Serie implementiert. Diese generieren jedoch aktuell ausschließlich statische Designs oder Logos.

In Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller sind bereits heute (2021) verschiedene Projektionssysteme zur Erzeugung von Inhalten im direkten Umfeld integriert. Die überwiegende Anzahl der Systeme werden in den Außenspiegel oder in die Tür integriert und bilden eine Logoprojektion (o.ä.) auf die Straße ab. Diese Projektion weist typischerweise einen Durchmesser unter einem Meter auf. Die Beleuchtungsoptik besteht aus einer LED und einem Kollimator. Nach dieser Kollimationsoptik folgt ein Graustufenbild, welches durch eine Projektionsoptik auf die Straße abgebildet werden kann. Durch diesen einfachen Aufbau ergibt sich ein kostengünstiges Produkt, welches bei (fast) senkrechter Projektion eine hohe Abbildungsqualität vorweist. Durch den Einbauort in der Tür ergeben sich jedoch diverse Nachteile: Bei einem Einbau in den Außenspiegel sind die Projektionen bei eingeklapptem Spiegel unter Umständen nicht sichtbar.

Des Weiteren folgt das projizierte Logo der Türbewegung, was in einigen Fällen unerwünscht sein kann. Durch den hohen Anbauort kann eine unbeabsichtigte Verdeckung des Logos durch ein Hineintreten / -fassen in den Strahlengang relativ schnell erfolgen. Durch die Integration des Projektionssystems in die Innenseite der Tür ist die Projektion, bevor die Tür geöffnet wird, nicht sichtbar.

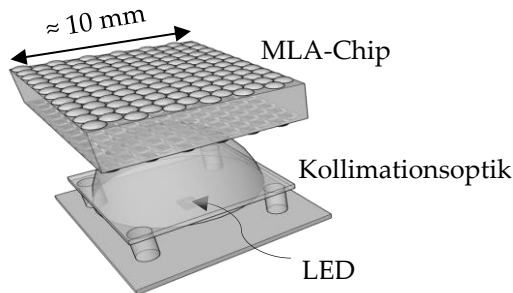
Bei einem Verbau des Moduls in den Schweller kann eine ortsfeste Projektion unabhängig von der Türposition generiert werden. Darüber hinaus wird eine Verdeckung des Strahlengangs deutlich unwahrscheinlicher. Nachteilig für diesen Einbauort ist der extrem schräge Projektionswinkel (siehe **Abbildung 2.2**). Um die hohen Anforderungen an die schräge Projektion befriedigen zu können, wird die MLA-Technologie verwendet. Ähnlich wie bei einer Einkanaloptik, wird das emittierte Licht der LED durch eine Kollimationslinse parallelisiert (siehe auch **Abbildung 2.3**).



**Abbildung 2.2:** Projektion aus dem Schweller.

Der MLA-Chip besteht aus einer Vielzahl von Projektionskanälen. Jeder Kanal setzt sich aus einer Kondensorlinse, einem Dia und einer Projektionslinse mit dem Durchmesser  $D$  und der Brennweite  $f$  zusammen. Durch die Miniaturisierung der Einzelkanäle ergibt sich für

einen kleinen Durchmesser der Projektionsoptik eine große Schärfentiefe. Gegenüber einem Projektionssystem mit identischer F-Zahl ( $=D/f$ ), einem größeren Durchmesser und einer identischen Lichtquelle sinkt jedoch der emittierte Lichtstrom<sup>4</sup>. Um dies zu kompensieren, wird der miniaturisierte Kanal unter Adaption der Objektebene vervielfacht und matrixförmig angeordnet (vergleiche MLA-Chip in **Abbildung 2.3**). Die Auslegung der Objektebene hat dabei so zu erfolgen, dass bei der Projektion durch die unterschiedlichen Kanäle ein integrales Bild auf dem Projektionsschirm entsteht [31]. Somit ist es möglich, schräge Projektionen mit einer hohen Bildgüte auch aus Anbaupositionen wie dem Schweller zu ermöglichen.



**Abbildung 2.3:** Schematischer Aufbau eines Projektionsmoduls, welches die MLA-Technologie verwendet.

---

<sup>4</sup> Diese Aussage ist für alle Systeme gültig, bei denen die Étendue der Lichtquelle größer oder identisch mit der des optischen Systems ist.

---

Erste Systeme für die Erzeugung von Umfeldprojektionen wurden bereits realisiert. Die Vielzahl an Ideen, die in Kapitel 1 und 2 beschrieben wurden, lassen sich jedoch nicht mit statischen Projektionstechnologien darstellen.

## 2.3 FAZIT

Wie in Kapitel 1 bereits vorweggenommen, zeigen die Auswertungen des Stands der Technik, dass dynamische Projektionen im Umfeld eines Fahrzeuges zunehmend an Relevanz für die Automobilindustrie gewinnen. Die Treiber dieser Projektionen sind eine erhöhte Funktionalität, neue Designmöglichkeiten oder die Erhöhung der Sicherheit.

Bisherige Veröffentlichungen legen den Fokus in einer Vielzahl von Anwendungen auf die Integration von Projektionssystemen in die Scheinwerfer. Der Rahmen und die technologischen Möglichkeiten von Systemen, welche in das direkte Umfeld des Fahrzeuges (Distanz weniger Meter) projizieren, wurden weitaus weniger untersucht, woraus sich die in Kapitel 1 dargestellte Zielstellung ableiten lässt. Weiterhin sind die Anforderungen an die unterschiedlichen Projektionen für die unterschiedlichen Bereiche bisher nicht klar definiert. Auch dies ist Ziel dieser Arbeit.

## Kapitel 3

# ANFORDERUNGEN FÜR EINE INTEGRA- TION KLEINER PROJEKTOREN IM FAHR- ZEUG

Die Anforderungen an konventionelle Systeme, wie zum Beispiel Abblend- und Fernlicht sind sehr präzise definiert. Ein Grund hierfür ist der ausdetaillierte rechtliche Rahmen. Darüber hinaus sind die Anforderungen durch die Automobilhersteller in den letzten Jahren immer weiter präzisiert worden. Auch die Grenzen der unterschiedlichen Technologien sind den Herstellern sehr gut bekannt. Im Gegensatz hierzu ist die gesetzliche Lage für Projektionen im Nahbereich des Fahrzeugs derzeit kaum definiert. Aktuell wird eine Anpassung des gesetzlichen Rahmens hinsichtlich der Verwendung von Projektionen um das Fahrzeug diskutiert [32]. Ebenso gibt es (aufgrund der Neuheit dieser Funktionen) auch von Entwicklerseite keine oder wenige Anforderungen. Für einen Technologievergleich sind jedoch die Kenntnisse der Anforderungen an die Systeme eine Grundvoraussetzung. Aufgrund der Varianz an Einsatzzwecken für



Projektionen, ist es sinnvoll, anwendungsspezifische Anforderungen zu generieren.

Die Vielzahl an Ideen, die in Kapitel 2 beschrieben wurden, lassen sich in unterschiedliche Kategorien einordnen. Folgend wurden vier Kategorien gewählt: Projektion als Designmittel, Projektion als Interaktionsmittel, Projektionen zur Erhöhung der Sicherheit und Projektionen als Kommunikationsmittel zwischen Mensch und Maschine im Verkehr. Folgend werden die wichtigsten Merkmale und die Anforderungen von der Beobachterseite dargestellt.

- *Projektionen als Designmittel*

Durch eine Designprojektion sollen Inhalte wie Logos, abstrakte Formen, Schriften und Symbole aus Abständen zwischen null und mindestens fünf Metern erkennbar sein. Die Substruktur des Bildgebers (einzelne Pixel) soll nach Möglichkeit aus dieser Distanz nicht erkennbar sein. Wie aktuelle Designprojektionen, sollte eine Sichtbarkeit ab Dämmerung ermöglicht werden. Dabei handelt es sich bei der Designprojektion um eine nicht sicherheitsrelevante Funktion. Ausfälle bei hohen oder niedrigen Temperaturen sollten demnach vermieden werden, sind jedoch kein Ausschlusskriterium.

- *Projektionen als Interaktionsmittel*

Durch Projektionen können Interaktionsflächen für kontaktloses Öffnen von Türen wie auch von Kofferraumklappen projiziert werden [33].

Somit sollen vor allem Symbole und abstrakte Formen, vereinzelt auch Schriften aus geringen Abständen des Beobachters zur Projektion (0 – 2 m) erkennbar sein. Um unterschiedliche Symbole zu ermöglichen, ist eine hohe Auflösung notwendig. Da diese Art der Projektion mit einer Funktion verknüpft ist, sollte diese möglichst tagsüber sichtbar sein. Die beschriebene Art von Projektionen ist jedoch nicht sicherheitsrelevant. Die Absicherung gegen Ausfälle (z.B. aufgrund thermischer Rahmenbedingungen) kann somit etwas geringer ausfallen.

- *Projektionen zur Erhöhung der Sicherheit*

Bei der Nutzung der Projektion als Sicherheitskomponente muss gewährleistet sein, dass diese auch aus größeren Abständen und bei möglichst hohen Umgebungsbeleuchtungsstärken zu erkennen ist. Eine Dynamik (auch einzelner Grafiken) kann die Aufmerksamkeit und somit eine Reaktionsbereitschaft zusätzlich erhöhen [34]. Um den Zweck zu erfüllen, ist dabei eine große Variation der Bildinhalte und eine extrem hohe Auflösung in vielen Fällen nicht notwendig.

Da es sich um eine sicherheitsrelevante Projektion handelt, sollte diese auch in thermisch anspruchsvollen Situationen funktionieren.

- *Projektionen als Kommunikationsmittel zwischen Mensch und Maschine im Verkehr*

Wird die Projektion als Kommunikationsmittel zum Beispiel im HAF oder VAF genutzt, sollte eine Erkennbarkeit aus größeren Distanzen gewährleistet werden. Notwendig ist hier die Wahl von einfachen Symbolen mit intuitiver Erkennbarkeit. Eine Dynamik und eine je nach Gesetzeslage farbige Darstellung der variablen Inhalte sollte möglich sein. Eine Sichtbarkeit am Tag wäre für eine umfassende Funktionalität von Relevanz.

In den folgenden Abschnitten werden die beschriebenen Anforderungen quantifiziert und in technologische Anforderungen übersetzt.

### **3.1 GRÖÙE DES PROJEKTIONSFELDES**

Bei den unterschiedlichen Kategorien werden die Projektionen aus unterschiedlichen Distanzen beobachtet. Design- und Interaktionsprojektionen werden vorwiegend aus nächster Nähe und kurzen Distanzen betrachtet. Sicherheitsprojektionen und Kommunikationsprojektionen sollten im Idealfall auch aus einem größeren Abstand gut

wahrnehmbar sein. Folgend werden, ausgehend hiervon, die notwendigen Größen der Projektionsfelder für die verschiedenen Kategorien hergeleitet.

Die Durchschnittsgröße einer weiblichen Person in Deutschland liegt laut Mikrozensus 2018 bei 1,66 m [35]. In China ist eine durchschnittliche Frau ca. 1,59 m groß [36]<sup>5</sup>. Aus diesen Daten wird angenommen, dass allgemein ein Abstand zwischen Beobachter und Projektionsfeld unter 1,50 m in nur seltenen Fällen erreicht wird. Zusätzlich befindet sich eine Person in den meisten Fällen nicht direkt auf dem Projektionsfeld, sondern in einiger Entfernung, so dass ebenso für kleinere Personen der Abstand von 1,5 m ein passendes Minimum ist.

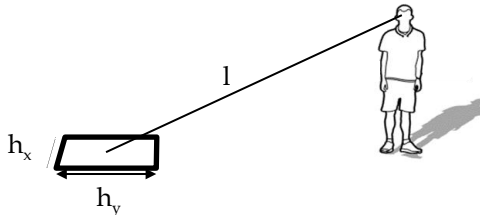
Eine untere Grenze für die unterschiedlichen Größen der Projektionsfelder lässt sich aus der Norm „Graphische Symbol-, Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen. Erkennungsweiten und farb- und photometrische Anforderungen“ [37] herleiten. Damit Symbole aus entsprechenden Entfernungen erkannt werden, sollten diese der Gleichung:

$$h = \frac{l}{z} \tag{3.1}$$

---

<sup>5</sup> Gewählt wurden Deutschland und China als wichtige Märkte für die Automobilindustrie. Außerdem wurde im Mann-Frau-Vergleich das Infimum gewählt. Da eine erwachsene Person in der Regel der Hauptnutzer der Fahrzeuge ist, wurde auf eine Betrachtung von Kindern verzichtet.

mit  $h$  = Höhe des Sicherheitszeichens und dem Betrachtungsabstand  $l$ , sowie dem Distanzfaktor  $z$  genügen.  $z$  kann die Werte 40 (für Verbotsszeichen, Gebotszeichen und Warnzeichen), 100 (für Rettungszeichen, Brandschutzzeichen und Zusatzzeichen) oder 300 (für Schriftgrößen) annehmen. Folgend wird angenommen, dass für  $z = 40$  eine gute Sichtbarkeit der Grafik gewährleistet werden kann. Für einen Beobachter, der sich in einem bestimmten Abstand von der Grafik befindet (siehe **Abbildung 3.1**) ist die geometrische Ausdehnung für die beiden Raumdimensionen  $h_x$  und  $h_y$  ( $x$ , bzw.  $y$  gibt die jeweilige Projektion von  $h$  auf die Straße an) bei konstantem Schwinkel unterschiedlich.



**Abbildung 3.1:** Beobachter und Projektionsfeld.

Bei der Implementierung einer Projektion zu gestalterischen Zwecken (als *Designprojektion*) ist es zielführend, wenn ein Beobachter im Abstand von ca. fünf Metern die Grafik gut erkennen kann. Aus den oben beschriebenen Annahmen ergibt sich somit eine untere Grenze für die Ausdehnung der Grafik von:

$$h_y = \frac{l}{z \cdot \cos(\gamma)} \approx \frac{5,22 \text{ m}}{40 \cdot \cos(73^\circ)} \approx 0,5 \text{ m} \quad (3.2)$$

Wobei sich  $h_y$  aus der Projektion von  $h$  ergibt, die aus dem schrägen Sehwinkel  $\gamma$  ( $=\tan^{-1}(5/1,5)$ ) resultiert. Für die Ausdehnung  $h_x$  ergibt sich eine Breite von ca. 13 cm. Damit die Projektion aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln die gleiche Erkennbarkeit bietet, sollte für beide Dimensionen der größere Wert (50 cm) angenommen werden. Eine Definition für die maximale Ausdehnung der Projektion ist nicht sinnvoll. Beispielhaft kann entlang der Fahrzeugseite und darüber hinaus eine Projektion mit einem Durchmesser von fünf bis zehn Metern denkbar sein. Hier ergeben sich die Restriktionen durch technologische Grenzen (und unter Umständen durch den rechtlichen Rahmen).

Bei der Nutzung von Projektionen als *Interaktionsfläche*, befindet sich der Beobachter, wie oben beschrieben, in direkter Nähe zur Projektion. Bei einem Abstand von ca. zwei Metern ergibt sich (Vorgehen analog zu oben) für eine gut erkennbare Projektion ein Minstdurchmesser von ca. 10 cm respektive 6 cm für die zweite Dimension, ( $z = 40$ ). Damit die Person aus unterschiedlichen Wahlmöglichkeiten auf der Projektion (zum Beispiel durch Platzieren eines Fußes auf unterschiedlichen Orten der Projektionsfläche) wählen kann, empfiehlt es sich, dass die Projektionsfläche breiter gestaltet wird. Somit wird für die erste Seite eine Mindestlänge von 10 cm und für die zweite Seite die doppelte Länge (20 cm) gewählt.

Die notwendige Dimensionierung von Projektionen als *Sicherheitskomponente* oder *Kommunikationsmittel* wurden in der Arbeit von Hofer [38] untersucht. Für unterschiedliche Abstände des Beobachters zwischen 0 und 25 m ergab sich eine optimale Größe des Projektionsfeldes von etwa einem Meter in beiden Dimensionen. In **Tabelle 3.1** sind die hergeleiteten Mindestdurchmesser, bzw. die aus den Studien empfohlenen Durchmesser der Projektionsfelder dargestellt.

**Tabelle 3.1:** Benötigte Durchmesser für eine Projektion. Die Werte sind als grober Mindestdurchmesser zu verstehen.

Szenario	Durchmesser der Projektion
Projektion als Designkomponente	mind. 0,5 m
Interaktionskomponente	$\approx 0,1 \times 0,2 \text{ m}^2$
Sicherheitskomponente (Tag/Nacht)	ca. 1 m
Kommunikation (HAF)	ca. 1 m

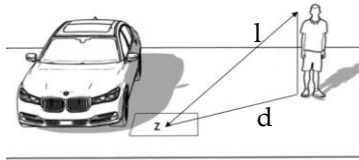
### 3.2 AUFLÖSUNG DES PROJEKTIONSFELDES

Folgend wird die notwendige Auflösung für eine maximale Bildgüte in typischen Anwendungssituationen ermittelt. Maximale Bildgüte bedeutet, dass der Beobachter nicht in der Lage ist, die Substruktur (in diesem Fall die einzelnen Pixel) des Bildes zu erkennen.

Für eine Person, welche sich in direkter Nähe der Projektion befindet (Beobachter steht senkrecht über der Projektion,  $d \approx 0 \text{ m}$ , Größe der Person 1,5 m), berechnet sich die maximal auflösbare Struktur  $d_{px}$  zu:

$$d_{px} = l \cdot \tan\left(\frac{1^\circ}{60}\right) = 1,5 \text{ m} \cdot \tan\left(\frac{1^\circ}{60}\right) \approx 0,4 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Dabei wird angenommen, dass die Auflösungsgrenze des Auges bei ca.  $(1/60)^\circ$  liegt [39].



**Abbildung 3.2:** Abstand des Beobachters zu einem beliebigen Punkt z innerhalb einer projizierten Fläche.

Bei dieser Abschätzung befindet sich die Projektion jedoch auf einem idealen Untergrund. Typischerweise weist eine Straße jedoch eine raue Oberflächenstruktur vor. Durch diese unebene Projektionsfläche wird die wahrgenommene Bildqualität vermindert. Dies bedeutet ebenfalls, dass eine Auflösung mit einer Pixelgröße von 0,4 mm auf unebenen Oberflächen nicht notwendig ist.

Im Rahmen einer Expertenstudie [40] wurde die akzeptable Größe der Substruktur / der Pixel für eine Projektion auf einem zum Asphalt ähnlichen Betonboden ermittelt. In dem betrachteten Fall handelte es sich um eine quadratische Substruktur. Eine hohe Bildgüte (= Substruktur nicht mehr zu erkennen) ergab sich für unterschiedliche Inhalte ab einer Kantenlänge des Pixels  $< 3 \text{ mm}$  (Beobachtungsabstand



variabel zwischen einem und mehreren Metern). Für Kantenlängen > 3 mm wurde der Bildeindruck insbesondere für runde Projektionsinhalte als nicht mehr wertig beschrieben. Die oben berechneten 0,4 mm sind somit für hochwertige Bildeindrücke nicht notwendig. Für ein hochaufgelöstes *Design* sowie für einige *Interaktionsprojektionen* (insbesondere Schrift) sollte diese Vorgabe an die Projektion ( $d_{\text{pix}} < 3 \text{ mm}$ ) erreicht werden. Sicherheitsprojektionen müssen in der Regel aus größeren Abständen erkannt werden (der ästhetische Anspruch ist hierbei zweitrangig). Eine Auflösung von 3 mm oder weniger ist nicht notwendig, da keine feinen Strukturen, sondern ein deutlich sichtbares Warnsymbol projiziert werden soll. Mit Strukturen, welche weitaus größer als  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  sind, lassen sich ebenso Warnsymbole projizieren. Für die HAF-Kommunikation sind keine feinen Schriftarten o.ä. notwendig.

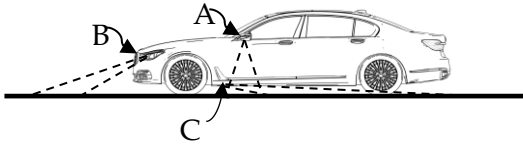
**Tabelle 3.2:** Benötigte Auflösung für eine Projektion.

Szenario	Auflösung der Substruktur
Projektion als Designprojektion	$\leq 3 \times 3 \text{ mm}^2$
Interaktionsprojektion	$\leq 3 \times 3 \text{ mm}^2$
Sicherheitsprojektion	$> 3 \text{ mm}^2$
HAF Kommunikation	$>> 3 \text{ mm}^2$

### 3.2.1 ÜBERTRAGUNG DER ANFORDERUNGEN AUF MÖGLICHE EINBAUORTE EINES FAHRZEUGES

Da für Projektionen verschiedene Einbauorte möglich sind, ergeben sich auch große Unterschiede in den Projektionswinkeln. Hieraus folgt, dass gleiche projektionssseitige Anforderungen bei unterschiedlichen Anbauorten zu verschiedenen systemseitigen Anforderungen führen.

Ob ein Projektionssystem die Substrukturen aus **Tabelle 3.2** auflösen kann, hängt stark mit dem Einbauort zusammen.

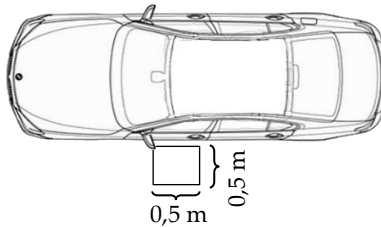


**Abbildung 3.3:** Beispielhafte Einbauorte von Projektions-  
systemen und deren Lichtkegel.

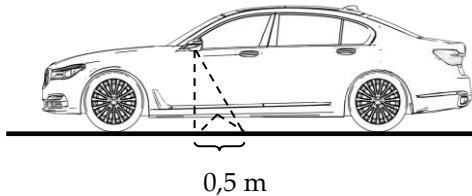
Die geringsten Anforderungen ergeben sich typischerweise für eine Projektion aus dem Außenspiegel (A in **Abbildung 3.3**).

Schräge Projektionen aus dem Scheinwerfer erfordern eine höhere Anforderung an die Auflösung des Projektionssystems. Die höchsten Anforderungen ergeben sich für Designdarstellungen aus dem Schweller (C in **Abbildung 3.3**) (jeweils abhängig von der Lage der Projektionsfelder und vergleichbaren Dimensionierungen dieser). In

Anhang B.3 sind die Berechnungen für unterschiedliche Randbedingungen (Dimension der Projektion sowie Anbauort) dargestellt. Exemplarisch werden hier die vom Anbauort abhängigen Anforderungen für eine Designprojektion mit einer Seitenlänge von jeweils 0,5 m dargestellt (**Abbildung 3.4**, **Abbildung 3.5**).



**Abbildung 3.4:** Draufsicht auf ein Projektionsfeld mit der Kantenlänge von jeweils 0,5 m.



**Abbildung 3.5:** Seitenansicht auf das Projektionsfeld mit der Kantenlänge von jeweils 0,5 m.

In dem hier gewählten Beispiel ergibt sich das notwendige Field of View (FOV) für eine Dimension bei einer Projektion aus dem Außenspiegel zu ca.  $26,6^\circ$ . Für eine Projektionseinheit aus dem Schweller, welche die Projektion aus einer Höhe von 0,2 m in einem Abstand

von etwa 0,5 m abbildet, ist das notwendige FOV sehr stark von der genauen Positionierung des Projektionssystems abhängig. Der erlaubte Fehler für Designprojektionen ergibt sich bei 3 mm zu ca.  $0,13^\circ$  aus dem Außenspiegel und zu  $0,097^\circ$  aus dem Schweller. Bezogen auf den erlaubten Fehler sind die Anforderungen an das in den Schweller integrierte Projektionssystem höher.

Weitere Szenarien sind in Anhang B.3 dargestellt. Dabei wurden unterschiedliche Dimensionen (bzgl. Geometrie und erlaubtem Fehler) und unterschiedliche Anbauorte gewählt. Die niedrigsten Anforderungen bzgl. der Auflösung ergeben sich für eine Sicherheitsprojektion aus dem Seitenspiegel, wie in **Tabelle 3.3** dargestellt. Die höchsten Anforderungen ergeben sich für eine Projektion aus dem Schweller für eine Designprojektion ähnlich der des bereits in Serie befindlichen Lichtteppichs (hier Design 2 genannt).

**Tabelle 3.3:** Klassifikation der unterschiedlichen Winkelfehler

Projektion (Anbauort)	Winkel
Design 2 (Schweller)	$< 0,002^\circ$
Sicherheit (Scheinwerfer)	$< 0,1^\circ$
Design (Außenspiegel)	$< 0,3^\circ$
Sicherheit (Außenspiegel)	$< 1^\circ$

Aus diesen Werten lässt sich eine Bewertungsskala generieren. Dabei wird den unterschiedlichen Auflösungen ein Wert (Res) zwischen 0 und 4 zugeordnet (**Tabelle 3.4**).

**Tabelle 3.4:** Bewertungsskala für das Auflösungsvermögen von Projektionssystemen

Res	Beschreibung
0	$< 1^\circ$
1	$0,3-1^\circ$
2	$0,1^\circ - 0,3^\circ$
3	$0,002^\circ - 0,1^\circ$
4	$< 0,002^\circ$

Die höchsten Anforderungen ergeben sich für Res = 4, was einer Auflösung von weniger als  $0,002^\circ$  entspricht. Die geringsten Anforderungen ergeben sich für Res = 0.

### 3.3 ERFORDERLICHE BELEUCHTUNGSSTÄRKEN

In unterschiedlichen Arbeiten wurden die benötigten Schwellenkontraste für Projektionen auf der Straße [41] und der Einfluss unterschiedlicher Straßen untersucht [42]. In dieser Arbeit wird auf die Ergebnisse von Hofer [38] zurückgegriffen, da die Rahmenbedingungen sehr ähnlich zu den hier behandelten Anwendungsfällen sind. In dieser Studie wurden unterschiedliche Schwellenwerte ermittelt. Der erste Schwellwert gab die für die Projektion benötigte Symbolbeleuchtungsstärke als Anteil ( $TH_i$ ) der

Umgebungsbeleuchtungsstärke an, die notwendig ist, damit 50% der Probanden den Inhalt der Projektion korrekt erkennen. Dieser Wert ergab sich zu  $TH_{0,5} = 8\%$ . Der Schwellwert, der sich ergibt, wenn 100% der Probanden den Inhalt der Projektion korrekt erkennen sollen, ergibt sich zu  $TH_1 = 13\%$ . Je nach Kategorie wird folgend  $TH_{0,5} = 8\%$  als Schwellwert gewählt (Designkomponente) oder  $TH_1 = 13\%$  (Interaktion, Sicherheit, Kommunikation). In **Tabelle 3.5** sind die Umgebungsbeleuchtungsstärken für verschiedene Situationen dargestellt [43, 44].

**Tabelle 3.5:** Darstellung typischer Beleuchtungsstärken für unterschiedliche Situationen [43, 44]

Situation	Typische Beleuchtungsstärken
Sonne im Zenit	110.000 lx
Mittags in Mitteleuropa (Sommer)	90.000 lx
Mittags in Mitteleuropa (Winter)	20.000 lx
Dämmerung	750 lx
Tiefgarage	200 lx
Straßenbeleuchtung	10 lx
Nacht bei Vollmond	0,27 lx

Für die Projektion als *Designkomponente* kann es unter Umständen ausreichend sein, dass das Nachterscheinungsbild des Fahrzeugs durch eine Lichtinszenierung erweitert wird. Somit sollte der Lichtstrom eine Erkennbarkeit ab Dämmerung (750 lx) ermöglichen:

$$E_{Thr,0,5} = Th_{0,5} \cdot E_{amb} = 0,08 \cdot 750 \text{ lx} = 60 \text{ lx} \quad (3.4)$$

Dabei wurde wie oben beschrieben für  $Th_{0,5}$  der Wert 0,08 gewählt, so dass mehr als 50% der Probanden die Projektion erkennen würden.

Ein *Interaktionsfeld* sollte zu jedem Zeitpunkt für jede Person sichtbar sein, damit sie sinnvoll genutzt werden kann. Dies würde bedeuten, dass

$$E_{Thr,1} = Th_1 \cdot E_{amb} = 0,13 \cdot 130.000 \text{ lx} \approx 17.000 \text{ lx} \quad (3.5)$$

generiert werden müssen. In diesem Fall ist  $Th_1 = 0,13$ .

Für eine *Sicherheitskomponente* muss unterschieden werden, ob diese ausschließlich in der Nacht genutzt wird oder ob diese auch am Tag sichtbar sein soll. Für letzteres wären ebenso 17.000 lx notwendig. Bei einer Nutzung in der Nacht würde eine „100-prozentige Erkennbarkeit“ ab Dämmerung und somit ca. 98 lx ein sinnvoller Wert sein.

Wird eine Projektion als *Kommunikationsmittel zwischen Mensch und Maschine* genutzt, ist die Sichtbarkeit am Tag notwendig. Somit ist die benötigte Beleuchtungsstärke durch 17.000 lx gegeben.

In **Tabelle 3.6** sind die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke nach den unterschiedlichen Szenarien aufgeschlüsselt. Für die Berechnung des benötigten Lichtstroms wurde eine quadratische (für die Interaktion eine rechteckige) Projektionsfläche mit den Ausdehnungen aus **Tabelle 3.1** als Seitenlänge angenommen.

**Tabelle 3.6:** Benötigte Beleuchtungsstärken und Lichtströme nach Anwendungsszenario.

Szenario	Benötigte Beleuchtungs- stärken	Fläche	Benötig- ter Licht- strom
Design	60 lx	0,25 m <sup>2</sup>	15 lm
Interaktion	17.000 lx	0,02 m <sup>2</sup>	340 lm
Sicherheit (Tag)	17.000 lx	1 m <sup>2</sup>	17.000 lm
Sicherheit (Nacht)	98 lx	1 m <sup>2</sup>	98 lm
HAF Kommunikation	17.000 lx	1 m <sup>2</sup>	17.000 lm

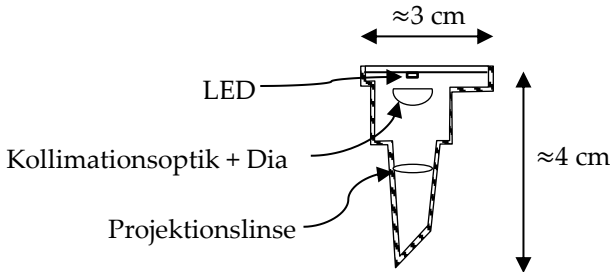
**Tabelle 3.7:** Bewertungsskala für die notwendigen Beleuchtungsstärken von Projektionsystemen mit gegebenen Projektionsfeldern (der Prozentwert gibt die Anzahl der Personen an, die in den Teststudien die Projektion korrekt erkannt haben).

E	Beschreibung
0	Nur sichtbar bei völliger Dunkelheit (< 1,3 lx)
1	sichtbar bei Straßenbeleuchtung (1,3 lx)
2	Für 50% korrekt erkennbar bei Dämmerung (60 lx)
3	Für 100% korrekt erkennbar bei Dämmerung (98 lx)
4	sichtbar bei sonnigem Tag (17.000 lx)



### 3.4 BAURAUUM

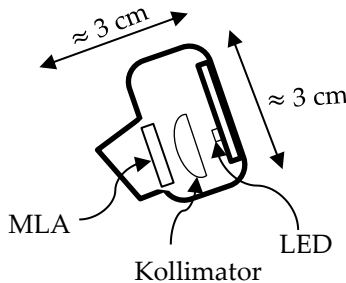
Aktuell implementierte Projektionstechnologien für Symbolprojektionen sind in zwei unterschiedlichen Bauräumen verortet. Diverse Hersteller bieten eine Logoprojektion aus dem Außenspiegel an [45, 46]. Aufgrund des begrenzten Bauraums hat beispielsweise ein Projektionsmodul für den MINI folgende Maße:



**Abbildung 3.6:** Bauraum eines Projektionsmoduls, welches in den Seitenspiegel integriert werden kann.

**Abbildung 3.6** die LED oben. Die optische Achse steht senkrecht auf der Platine, so dass die Lichtaustrittsöffnung unten zu finden ist. In Zukunft ist mit einer Platzreduktion im Außenspiegel zu rechnen. Gründe hierfür sind die vermehrte Integration von Sensorik / Kamerasystemen sowie die Minimierung des Außenspiegelvolumens aus ästhetischen Gründen und zur Verminderung des Luftwiderstandes des Fahrzeuges. Die Projektoren müssen also ein kleineres Volumen aufweisen als dies aktuell der Fall ist.

Bei der Projektion aus dem Schweller ist ähnlich wenig Bauraum vorhanden. Ein „Lichtteppichmodul“ ist in **Abbildung 3.7** dargestellt. Aus den Darstellungen ist ersichtlich, dass der Bauraum für eine Integration im Fahrzeug an den unterschiedlichsten Stellen sehr gering ist. Maximalausdehnungen liegen bei etwa 4 cm inklusive Kühlvorrichtung, Ansteuerung und Steckverbindungen.



**Abbildung 3.7:** Bauraum für das Lichtteppichmodul.

Bei der Integration eines Projektionsmoduls in den Scheinwerfer, ergeben sich größere Dimensionen. Die Dimensionen eines im Serieneinsatz befindlichen Projektionssystems beläuft sich aktuell auf ca.  $15\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ .

Neben den bereits genutzten Bauräumen, ergeben sich weitere Möglichkeiten zum Verbau eines Projektionssystems. In den meisten Fällen ist der Bauraum jedoch stark begrenzt. Modulgrößen beispielsweise für den Seitenspiegel oder den Lichtteppich sind hier eine gute Richtgröße. In **Tabelle 3.8** sind die unterschiedlichen Bauraumanfor-

derungen für die Integration von Projektionssystemen in ein Fahrzeug dargestellt. Damit eine Integration in allen Fahrzeugmodellen gelingen kann, sind die Anforderungen bezüglich des Bauraums (im Vergleich zu den hier angegebenen Modulgrößen) weiter angehoben. Somit ist zu beachten, dass im Einzelfall größere Bauräume genutzt werden können.

**Tabelle 3.8:** Die unterschiedlichen Bauraumanforderungen für die Integration von Projektionssystemen in ein Fahrzeug.

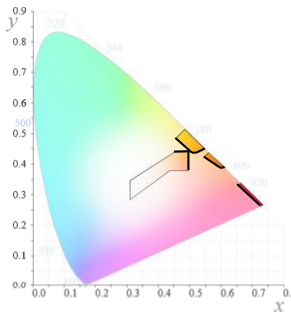
Bau	Beschreibung
0	$> 500 \text{ cm}^3$
1	$200 - 500 \text{ cm}^3$
2	$50 - 200 \text{ cm}^3$
3	$15 - 50 \text{ cm}^3$
4	$0 - 15 \text{ cm}^3$

Die sich hieraus ergebende Bewertungsskala ist in **Tabelle 3.9** dargestellt. Je niedriger der Wert „Bau“ ist, desto schwieriger ist die Integration in das Fahrzeug.

**Tabelle 3.9:** Bewertungsskala zur Klassifizierung von Bauräumen.

Beispiel für Anbauort	Bauraum
Schweller	< 15 cm <sup>3</sup>
Außenspiegel	< 50 cm <sup>3</sup>
Heck o.ä.	< 200 cm <sup>3</sup>
Scheinwerfer	< 500 cm <sup>3</sup>
Schwer zu integrieren	> 500 cm <sup>3</sup>

### 3.5 FARBE DER PROJEKTION



**Abbildung 3.8:** CIE-Normfarbtafel (Quelle: [47]). Nach ECE-Regelung zugelassene Farbräume sind hervorgehoben, nicht zugelassene Räume sind aufgehellt.

In den ECE-Regelungen werden die Farborte definiert, die für Beleuchtungszwecke im Exterieur eines Fahrzeuges verwendet werden dürfen. Die Farbbereiche für weiß, gelb, amber und rot sind in **Abbildung 3.8** hervorgehoben [48].

Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit werden die Randbedingungen für Lichtfunktionen im Hinblick auf das autonome Fahren diskutiert [49]. Somit kann eine Erweiterung der zulässigen Farben in der Exterieur-Beleuchtung (auch in nicht ECE-zugehörigen Ländern) nicht ausgeschlossen werden [50].

### **3.6 FLIMMERVERSCHMELZUNGSFREQUENZ / REGENBOGENEFFEKT**

Für die Darstellung von dynamischen Inhalten werden in diversen Projektionssystemen mehrere Bilder in einem kurzen zeitlichen Abstand sequentiell dargestellt. Bei Frequenzen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) ist der Beobachter nicht mehr in der Lage die Einzelbilder aufzulösen. Die FVF ist von diversen Faktoren wie dem der Leuchtdichte, dem Kontrast, dem Alter des Rezipienten, dem Ort des Abbildes auf der Netzhaut, Duty cycle etc. abhängig. Eingehende Untersuchungen zu diesem Thema wurden durch Polin [51] durchgeführt. Dabei ergibt sich, dass die FVF für unterschiedliche Wahrnehmungswinkel jeweils unter 55 Hz liegt [51].

Ein weiterer Effekt, der sich bei dem Beobachter von gepulsten Lichtquellen einstellen kann, ist der Stroboskopeffekt [52]. Bei gepulster Beleuchtung eines sich kontinuierlich bewegenden Objektes erscheint dieses für den Beobachter diskontinuierlich.

Bei der Beleuchtung durch eine sequentiell gepulste RGB-Lichtquelle können Sakkaden den sogenannten Regenbogeneffekt hervorrufen,

welcher zu starken Irritationen führen kann [53]. In der Arbeit von Polin wurde eine spektrale Varianz der Schwellenfrequenz bei vertikalen wie auch horizontalen Sakkaden untersucht. Bei einer Objektleuchtdichte von  $0,1 \text{ cd/m}^2$  ergibt sich beispielsweise für grünes Licht (520 nm) ein oberes Limit von über 1 kHz [51] bei horizontalen Sakkaden. Ziel für ein Projektionssystem sollte es sein, dass der Regenbogeneffekt als nicht störend wahrgenommen wird. Da die Sichtbarkeit von einer Vielzahl von Parametern abhängt, muss situativ geprüft werden, ob sich eine sequentielle RGB-Beleuchtung unterhalb der maximalen Schwellenfrequenz (ca. 1 kHz bei grünem Licht) negativ auf die Darstellung der Projektion auswirkt. Eine tiefere Untersuchung hierzu findet sich in Kapitel 4 .

### 3.7 KONTRAST, GRAUSTUFEN UND SCHWARZWERT





Für eine gute Sichtbarkeit von Displayinhalten wird in dem Standard ISO 15008 [54] eine von der Umgebungsbeleuchtungsstärke abhängige Kontrastanforderung dargestellt. Die Anzahl der notwendigen Graustufen hängt stark von den dargestellten Inhalten ab. In der Arbeit [40] wurden Testbilder mit unterschiedlichen Kontrasten zu ihren Nachbarfeldern verglichen. Wenn die Struktur durch starke Sprünge im Kontrast gebildet wird, ist eine Reduktion der Graustufen bei einem subjektiv gleichbleibenden Eindruck des Bildes möglich (siehe **Tabelle 3.11**, oben).

**Tabelle 3.10:** Minimale Kontrastanforderung nach DIN 15008:20009 [54] in Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtungsstärke.

Szenario	EUMG	Kontrastanforderung
Nachtzustand	< 10 lx	5:1
Zwielichtzustand	250 lx	3:1
Tageszustand	5 klx	3:1
direktes Sonnenlicht	45 klx	2:1

Bei einer fast kontinuierlichen Kontraständerung innerhalb eines Bildes wird durch die Reduktion der Graustufen subjektiv ein anderer Bildeindruck hervorgerufen (vergleiche **Tabelle 3.11** unten).

**Tabelle 3.11:** Auswirkung der Reduktion von Graustufen auf Bilder mit hohem Kontrast zum Nachbarfeld (oben) und auf Bilder mit niedrigem Kontrast zum Nachbarfeld (unten).

Kontrast	21 Graustufen	5 Graustufen
Hoch		
Niedrig		

Aufgrund der starken Abhängigkeit der notwendigen Graustufen des dargestellten Inhalts, lässt sich eine explizite Graustufenanforderung allgemein nicht definieren.

### 3.8 AUGENSICHERHEIT

Nach Möglichkeit sollten die Systeme augensicher sein. Dies ist insbesondere für Lasersysteme eine essentielle Anforderung. Bei einem statischen, kontinuierlichen Laserstrahl sollte beispielsweise die Leistung des Lasers nicht den Wert von 1 mW überschreiten, da dieser somit in Klasse 3 fallen würde und somit eine Gefahr für die Augen darstellt (vgl. **Tabelle 4.2**).

Die Projektionssysteme müssen nach der Norm DIN EN 60825 [55] augensicher sein. In dieser Arbeit wird ein System als augensicher eingestuft, wenn dieses der Laserklasse II entspricht. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass die Leistung oder die Funktionalität des Projektionssystems eingeschränkt werden müssen. Damit ein Projektionssystem beispielhaft in der Bewertungsskala auf AS = 3 Punkte kommt, muss dieses System in der Lage sein, Silhouettenprojektionen in 100% der angeforderten Helligkeit zu ermöglichen. Dies würde bedeuten, dass für eine Sicherheitsprojektion eine Silhouette mit mindestens 17000 lx projiziert werden muss und das System dabei maximal in Klasse 2 fällt.



**Tabelle 3.12:** Bewertungsskala für die Augensicherheit (AS) von Projektionssystemen.

AS	Beschreibung
0	Silhouette oder flächige Ausleuchtung bei < 10% der Anforderungshelligkeit, Klasse 2
1	Silhouette oder flächige Ausleuchtung zwischen 10% und 50% der Anforderungshelligkeit, Klasse 2
2	Silhouette oder flächige Ausleuchtung mit mind. 50% der Anforderungshelligkeit, Klasse 2
3	Silhouette bei mind. 100% der Anforderungshelligkeit, Klasse 2
4	Silhouette und flächige Ausleuchtung bei mind. 100% der Anforderungshelligkeit, Klasse 2

### 3.9 THERMISCHE EIGENSCHAFTEN

Die thermischen Eigenschaften von Projektionssystemen sind ein weiterer wichtiger Punkt sind. Dabei sollte bei der Bewertung zwischen zulässiger Einschaltdauer und notwendiger Kühlung des Systems unterschieden werden.

**Tabelle 3.13:** Bewertungsskala für die thermische Verfügbarkeit (TV) von Projektionssystemen.

TV	Beschreibung
0	Nur mit aktiver Kühlung zwischen $-20^{\circ}\text{C}$ und $+40^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur nutzbar
1	Mit passiver Kühlung zwischen $-20^{\circ}\text{C}$ und $+40^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur für eine Zeit $T < 300$ s nutzbar
2	zwischen $-20^{\circ}\text{C}$ und $+40^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur mit passiver Kühlung für eine Zeit $T > 300$ s nutzbar
3	zwischen $-40^{\circ}\text{C}$ und $+40^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur mit geringer passiver Kühlung für eine Zeit $T > 300$ s nutzbar
4	Ohne Einschränkungen mit geringer passiver Kühlung zwischen $-40^{\circ}\text{C}$ und $40^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur nutzbar

---

Für die thermische Verfügbarkeit  $TV = 0$  ist eine Nutzung des Systems bei einem eingeschränktem Temperaturbereich nur mit aktiver Kühlung möglich. Bei  $TV = 4$  ist über den kompletten Temperaturbereich nur eine passive Kühlung mit geringem Volumen notwendig. Die Mindestanforderungen bei *Designprojektionen* sind niedriger. In vielen Fällen werden sie nur beim Herantreten an das Fahrzeug oder

Verlassen projiziert. Somit müssen diese nur für eine kurze Zeit (< 300 s) im Goodbye- oder Welcome-Szenario genutzt werden. *Sicherheitsrelevante* Projektionen sollten jederzeit ohne zeitliche Einschränkungen funktionieren.

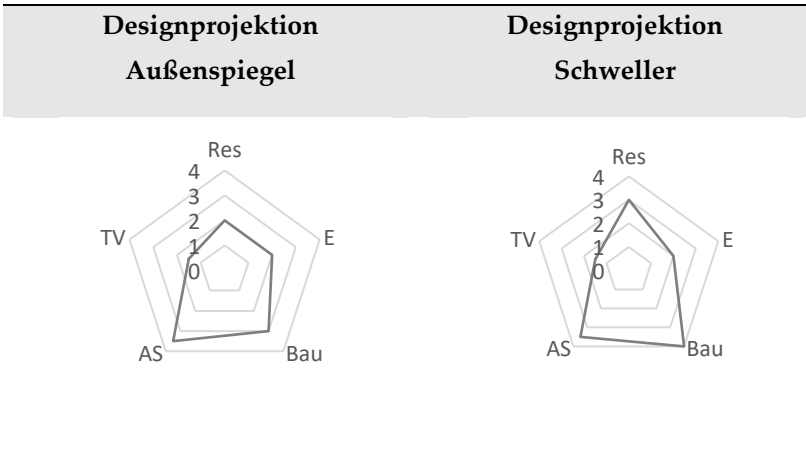
### 3.10 ZUSAMMENFASSUNG DER ANFORDERUNGEN

Für die jeweiligen Projektionsszenarien ergeben sich unterschiedliche Anforderungen. Diese hängen von den beobachterseitigen Anforderungen und dem gewählten Anbauort ab. In diesem Abschnitt sind beispielhaft unterschiedliche Anforderungen dargestellt. Es werden folgende Abkürzungen genutzt: Res = Auflösung (lässt sich aus **Tabelle 3.2**, **Tabelle 3.4** und Anhang B.3 ermitteln). E = Beleuchtungsstärke (Bestimmung durch **Tabelle 3.6** und **Tabelle 3.7**), Bau = Bauraum, (**Tabelle 3.8** und **Tabelle 3.9**), AS = Augensicherheit (**Tabelle 3.12**).

#### 3.10.1 DESIGN

Am Beispiel einer Designprojektion wird folgend ein Netzdiagramm für eine Projektion aus den Anbauorten „Außenspiegel“ und „Schweller“ erstellt. Wie aus **Tabelle 3.2** zu erkennen, sollte die Auflösung für eine Designprojektion nach Möglichkeit kleiner als 3 mm in beiden Dimensionen sein. Dies bedeutet bei einem Projektionsfeld

von 0,5 m x 0,5 m eine Auflösung von 0,13°. Für ein gleiches Projektionsfeld aus dem Schweller ist hingegen eine Auflösung von 0,097° notwendig. Mit **Tabelle 3.4** kann hieraus der Res-Wert ermittelt werden. Im vorliegenden Fall ergibt sich Res = 2 für den Außenspiegel und Res = 3 für den Schweller. Da es sich um eine Designprojektion handelt, ist die erforderliche Beleuchtungsstärke für beide Anbauorte identisch. Die Bauraumanforderungen sind für den Schweller höher als für den Außenspiegel, wie aus **Tabelle 3.8** und **Tabelle 3.9** abzulesen ist. Da bei Designprojektionen sowohl Silhouetten wie auch flächige Ausleuchtungen genutzt werden können, wird nach **Tabelle 3.12** der Wert 3,5 gewählt.



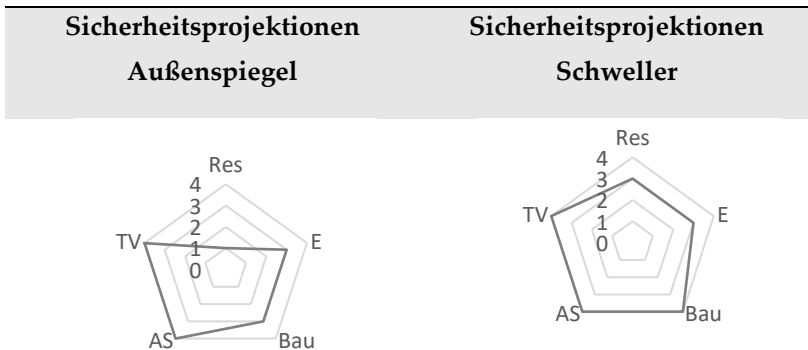
---

**Abbildung 3.9:** Anforderungen an eine Designprojektion. Links: bei Projektion aus dem Außenspiegel, rechts: bei Projektion aus dem Schweller.

Im Idealfall kann eine Designprojektion mindestens 30 s oder länger bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen genutzt werden. Sehr viel längere Einschaltzeiten sind im Allgemeinen nicht notwendig, da diese aktuell nur als Welcome- oder Goodbye-Inszenierung genutzt werden. Aus **Tabelle 3.13** kann als Mindestanforderung somit  $TV = 2$  ermittelt werden.

### 3.10.2 SICHERHEITSPROJEKTION

Bei analoger Vorgehensweise ergeben sich beispielhaft für eine Sicherheitsprojektion, die am Tag sichtbar sein soll, die in **Abbildung 3.10** dargestellten Netzdiagramme.



---

**Abbildung 3.10:** Anforderungen an eine Sicherheitsprojektion. Links: bei Projektion aus dem Außenspiegel, rechts: bei Projektion aus dem Schweller.

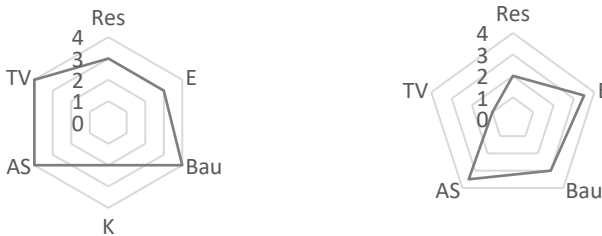
---

Der Bauraum und die Augensicherheit lassen sich identisch wie bei Design bestimmen. Die benötigte Auflösung ist geringer als bei Designprojektionen. Die erforderliche Beleuchtungsstärke ist jedoch sehr viel höher. Bei einer Nutzung am Tag ist die Anforderung an den Kontrast geringer. Da die Projektion die Sicherheit erhöhen soll, ist die Nutzbarkeit dieser Funktion am Tag über einen längeren Zeitraum auch ohne zusätzliche Kühlung sinnvoll (TV=4).

Wenn eine Sichtbarkeit ab Dämmerung hinreichend ist, ändern sich die Werte E und K jeweils auf den Wert 2.

### 3.10.3 INTERAKTION

Interaktion Außenspiegel	Interaktion Schweller
--------------------------	-----------------------



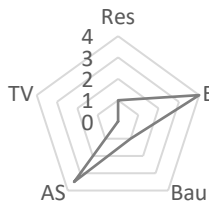
**Abbildung 3.11:** Anforderungen an eine Interaktionsprojektion. Links: bei Projektion aus dem Außenspiegel, rechts: bei Projektion aus dem Schweller.

Für Interaktionsprojektionen sind hohe Beleuchtungsstärken (auch auf kleinen Projektionsfeldern) für eine durchgehende Nutzbarkeit notwendig. Eine hohe Auflösung ermöglicht verschiedene Inhalte auch auf kleinen Flächen.

### 3.10.4 KOMMUNIKATION (HAF)

Für HAF-Projektionen reichen rudimentäre Symbole aus. Die Anforderungen an die Auflösung an das Projektionsfeld sind sehr viel geringer als bei Designprojektionen. Übertragen auf den Einbauort (Scheinwerfer) ergeben sich jedoch sehr flache Projektionswinkel, welche trotz grober Auflösung auf dem Projektionsfeld eine hohe Anforderung an das Projektionssystem generieren. Diese sollten jedoch nach Möglichkeit auch tagsüber sichtbar sein.

#### HAF Scheinwerfer



---

**Abbildung 3.12:** Anforderungen an eine HAF-Projektion aus dem Scheinwerfer.

## Kapitel 4

# TECHNOLOGISCHE EINSCHRÄNKUN- GEN DURCH PHYSIOLOGISCHE RAH- MENBEDINGUNGEN

In diesem Kapitel werden Aspekte der Augensicherheit und der Flimmerverschmelzungsfrequenz im Kontext von Umfeldprojektionen eingehend untersucht. Im ersten Abschnitt werden die maximal darstellbaren Beleuchtungsstärken für augensichere Lasersysteme hergeleitet. Im zweiten Teil (Kapitel 4.2) wird der Einfluss sequentieller Beleuchtung mit niedriger Colorfielddrate (Anzahl der unterschiedlichen Farbbilder pro Sekunde) (LCoS-System) und höherer Colorfielddrate (DMD-System) bewertet und Auswirkungen auf die Technologiewahl beschrieben.

### 4.1 AUGENSICHERHEIT

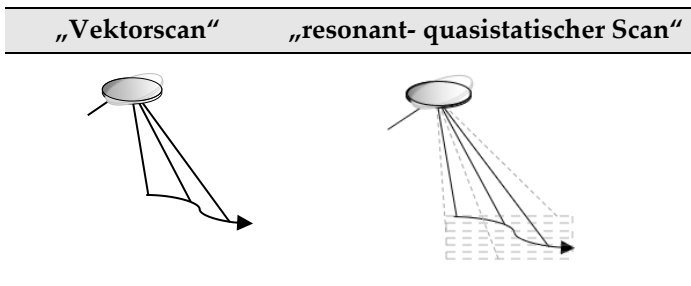
Gegenüber LED-Projektionssystemen weisen Laser-Projektionssysteme aufgrund der geringen Étendue der Quelle große Vorteile in



Bauraum und Effizienz auf. Nachteilig ist jedoch unter anderem die weitaus größere Gefahr für die Augen [55]. Eine theoretische Untersuchung der Gefährdung durch den Einsatz eines Laserscanners im fahrenden Betrieb findet sich in der Arbeit von Kloppenburg [56]. In dieser bewegt sich das Projektionssystem mit dem Fahrzeug, wodurch ein Blick aus direkter Nähe in die Lichtquelle nicht möglich ist. Durch diese Einschränkung befindet sich der Beobachter in einer größeren Distanz zu dem Projektionssystem. Somit wird nur ein kleiner Bruchteil des Lichtstroms vom Betrachter erfasst und ein hoher Lichtstrom kann emittiert werden, wodurch hohe Beleuchtungsstärken auf der Straße ermöglicht werden. Bei der Nutzung von Projektionen im Stand oder langsamer Fahrt muss jedoch auch der direkte Blick in das Projektionssystem aus nächster Nähe untersucht werden. Projektoren, welche Laser als Lichtquelle nutzen, werden nach DIN EN 60825 [55] klassifiziert. Typischerweise sollten Systeme der Klasse 1 oder 2 angehören, damit sie als augensicher eingestuft werden können. Strahlung ab Klasse 3R kann irreparable Schäden am Auge hervorrufen. Eine abschließende Beurteilung über die Anwendbarkeit der Norm auf scannende Systeme steht noch aus. Dennoch lassen sich die erzielbaren Beleuchtungsstärken näherungsweise für unterschiedliche Lasersysteme berechnen [57].

In diesem Kapitel wird die maximale Beleuchtungsstärke berechnet, die ein augensicheres Laser-Scannersystem generieren kann. Dabei wird zwischen unterschiedlichen Betriebsmodi unterschieden. Der erste Modus wird folgend als „Vektorscan“ beschrieben. Bei diesem führt ein Mikrospiegel den Laserstrahl entlang einer Trajektorie, die

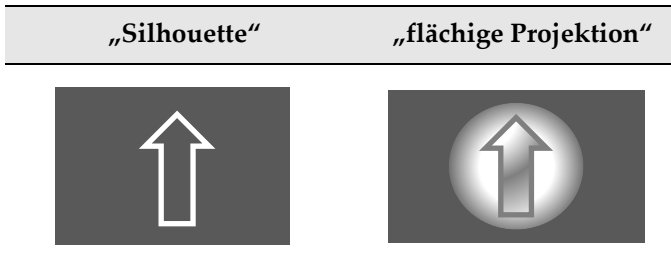
der finalen Silhouette der Abbildung entspricht (kleine Abweichungen zwischen Bild und Trajektorie können aufgrund der Trägheit des Spiegels beispielsweise an Umkehrpunkten des projizierten Symbols auftreten). In diesem Modus wird der Lichtstrom auf eine minimale Fläche verteilt und hohe Beleuchtungsstärken generiert (**Abbildung 4.1**, links). Bei der zweiten Methode (folgend „resonant- quasistatisch“ genannt) fährt der Scanner für jedes Bild die gleiche Trajektorie ab (**Abbildung 4.1**, rechts, gestrichelt), wobei der Bildeindruck durch die Modulation der Lichtquelle(n) entsteht.



**Abbildung 4.1:** Vergleich der Arbeitsweise „Vektorscan“ und „resonant- quasistatischer Scan“.

Typischerweise lassen sich Vektorscanner für die Projektion von Silhouetten von Objekten oder Schriften (**Abbildung 4.2**, links) sehr gut verwenden.

Mit dem resonant- quasistatischen Scan lassen sich ebenso flächige Projektionen (**Abbildung 4.2**, rechts) gut darstellen.



**Abbildung 4.2:** Unterschiedliche Darstellungen eines Pfeils. Links: Silhouette, rechts: mit verschiedenen Grautönen gefülltes Projektionsfeld.

#### 4.1.1 MÖGLICHE BELEUCHTUNGSSTÄRKE EINES PUNKTES

Im Folgenden wird die maximale Beleuchtungsstärke ermittelt, die ein augensicheres System ermöglichen kann. Aufgrund der komplexen Berechnung, wird zunächst beispielhaft ein vereinfachtes Szenario untersucht: die Projektion eines sich nicht bewegenden Punktes.

Die für die Laserklasse  $i$  maximal erlaubte Leistung  $P_{\max,i}(\lambda)$  wird durch die Norm DIN EN 60825 definiert. Bei der Nutzung eines monochromatischen Lasers ergibt sich die wellenlängenabhängige maximale Beleuchtungsstärke  $E_{\max,i}(\lambda)$  durch:

$$E_{\max,i}(\lambda) = \frac{K_m \cdot V(\lambda) \cdot P_{\max,i}(\lambda)}{A_{Spot}} \quad (4.1)$$

mit dem maximalen photometrischen Strahlungsäquivalent  $K_m$ , der relativen Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$  und dem Flächeninhalt des Spots

$A_{\text{spot}}$ . Dabei werden eine geringe Divergenz und ein runder Spot mit einem Durchmesser von 3 mm angenommen. Bei einer Divergenz kleiner als 1,5 mrad handelt es sich nach der Norm DIN EN 60825 um keine ausgedehnte Quelle [55]. Die Grenzwerte, die sich bei verschiedenen Farben für nicht ausgedehnte Quellen ergeben, sind für die erste und zweite Laserklasse in **Tabelle 4.1** und **Tabelle 4.2** dargestellt.

Für eine Mischung von RGB- Laserlicht zu Weißlicht mit den Farbkoordinaten ( $x = y = 0,33$ ) ergeben sich die Anteile R : G : B zu 0,53 : 0,28 : 0,19 (mit den beispielhaft gewählten Wellenlängen  $\lambda(\text{rot}) = 642 \text{ nm}$ ,  $\lambda(\text{grün}) = 532 \text{ nm}$  und  $\lambda(\text{blau}) = 445 \text{ nm}$ ). Somit folgt:

$$\begin{aligned} P(642 \text{ nm}) &= 0,53 \cdot P_{\text{max},i}(\text{RGB}) \\ P(532 \text{ nm}) &= 0,28 \cdot P_{\text{max},i}(\text{RGB}) \\ P(445 \text{ nm}) &= 0,19 \cdot P_{\text{max},i}(\text{RGB}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

mit der maximalen Leistung  $P_{\text{max},i}(\text{RGB})$  für die RGB- Weißlichtmischung. Bei einer Mischung der Farbe aus mehreren Wellenlängen gilt nach der Norm DIN EN 60825 die Bedingung:

$$\sum_n \frac{P(\lambda_n)}{P_{\text{max},i}(\lambda_n)} \leq 1 \quad (4.3)$$

für die jeweilige Laserklasse. Aus den Formeln (4.2) und (4.3) lässt sich  $P_{\text{max},i}(\text{RGB})$  für die Weißlichtmischung bei den verschiedenen Laserklassen bestimmen. Die Grenzwerte für monochromatische Strahlung sind jeweils direkt in der Norm gegeben.

**Tabelle 4.1:** Grenzwerte für eine Punktdarstellung (Kreis mit Durchmesser = 3 mm) für unterschiedliche Wellenlängen bei Laserklasse 1.

Farbe ( $\lambda$ )	$P_{\max,1}$ (W)	$\phi$ (lm)	$E_{\max,1}$ (lx)
Blau (445 nm)	$3,9 \cdot 10^{-5}$ W	$1,1 \cdot 10^{-3}$ lm	$\approx 158$ lx
Grün (532 nm)	$3,9 \cdot 10^{-4}$ W	0,236 lm	$\approx 33.350$ lx
Rot (642 nm)	$3,9 \cdot 10^{-4}$ W	0,043 lm	$\approx 6.000$ lx
Weiß (R, G, B)	$1,44 \cdot 10^{-4}$ W	0,009 lm	$\approx 1.290$ lx

**Tabelle 4.2:** Grenzwerte für eine Punktdarstellung für unterschiedliche Wellenlängen bei Laserklasse 2.

$\lambda$	$P_{\max,2}$	$\phi$	$E_{\max,2}$
Blau (445 nm)	1 mW	0,03 lm	$\approx 4.050$ lx
Grün (532 nm)	1 mW	0,60 lm	$\approx 85.500$ lx
Rot (642 nm)	1 mW	0,11 lm	$\approx 15.450$ lx
Weiß (R, G, B)	1 mW	0,23 lm	$\approx 32.800$ lx

Bei einer Projektion mit grünem Laserlicht können die höchsten Beleuchtungsstärken generiert werden. Die Projektion eines weißen Punktes ist unter normalen Umständen am Tag nur möglich, wenn die Grenzwerte der Klasse 2 herangezogen werden. Da die Gefahren für das Auge ab Klasse 3R erst erheblich werden, wird folgend die Klasse 2 als Grenzwert festgelegt.

#### 4.1.2 BELEUCHTUNGSSTÄRKE EINER SCANTRAJEKTORIE EINES VEKTORSCANNERS

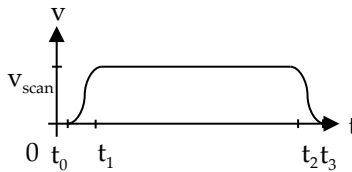
Um eine Kommunikation zu ermöglichen, sind eine Vielzahl von Linienzügen notwendig. Aus diesen können dann komplexere Formen wie Symbole oder Schriften etc. dargestellt werden.

Zunächst wird ein Vektorscan untersucht, welcher aus einer Höhe von einem Meter (bspw. Außenspiegel) verschiedene Projektionen (mit unterschiedlicher Länge der Scantrajektorie  $l_{\text{Proj}}$ ) auf der Straße generiert. Der Beobachter befindet sich in einem Abstand von zehn Zentimetern vor dem Projektionssystem, wie in der Norm DIN EN 60825 beschrieben. In dem vorliegenden Anwendungsfall ist dieser Abstand realistisch und sinnvoll (nähere Abstände sind aufgrund mangelnder Akkommodationsfähigkeit des Auges weniger gefährlich [58]).

Für den Fall, dass der Spiegel bei der Projektion der kompletten Grafik mit konstanter Winkelgeschwindigkeit arbeitet, ist der Lichtstrom und somit die Gefährdung für das Auge über den kompletten Winkelbereich bei konstantem Abstand zur Quelle identisch. Eine konstante Winkelgeschwindigkeit führt jedoch dazu, dass die Schreibgeschwindigkeit auf der Projektionsfläche variiert. Die kürzeren Aufenthaltsdauern an den vom Projektionssystem weiter entfernten Flächen führen dort somit nach dem Talbotschen Gesetz zu einer niedrigeren Leuchtdichte. Um eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke an jeder Stelle des Projektionsfeldes zu erzielen, müssen in gleichen

Zeiträumen demnach die gleichen Flächeninhalte auf der Straße beleuchtet werden. Dies kann durch eine variierende Winkelgeschwindigkeit des Mikrospiegels erreicht werden. Somit wird die Schreibgeschwindigkeit auf der Straße (nicht die Winkelgeschwindigkeit des Mikrospiegels) während eines Projektionszuges als konstant angenommen.

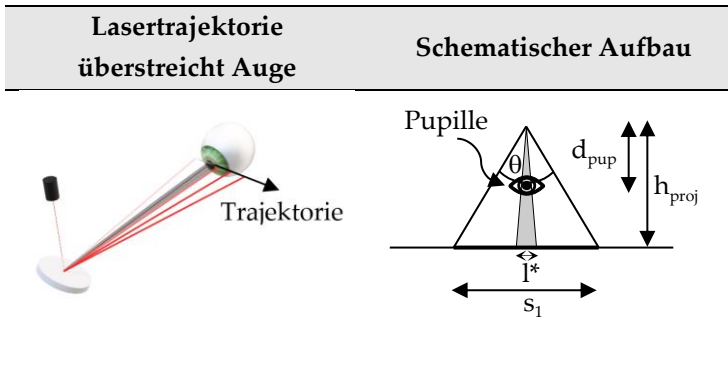
Weiterhin wird angenommen, dass die Zeit ( $t_1-t_0$ ) zum Erreichen der notwendigen Schreibgeschwindigkeit  $v_{scan}$  (gemessen am Ort der Projektion) klein ggü. der Zeit  $t_3-t_0$  oder  $t_2-t_1$  ist (vgl. **Abbildung 4.3**) und die Lichtquelle während dieser „Umkehrzeiten“ ausgeschaltet ist.



**Abbildung 4.3:** Temporaler Verlauf der Schreibgeschwindigkeit (auf der Projektionsfläche) bei einer Linie.

Eine weitere Annahme ist, dass die Breite der Silhouette durch einen einzelnen Trajektorienzug dargestellt werden kann. Folglich ist die Strichbreite durch die Auslegung des Lasers, dem Anbauort und dem Projektionswinkel definiert. Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, ist ein Spotdurchmesser und somit eine Linienbreite von drei Millimetern für typische Anbausituationen im Fahrzeug möglich. Demnach wird der komplette Lichtstrom bei Überstreichen der sieben Millimeter

breiten Apertur (Pupille) eingesammelt und auf die Netzhaut projiziert (vergleiche grau markierter Bereich in **Abbildung 4.4**, links, rechts und **Abbildung 4.6**).



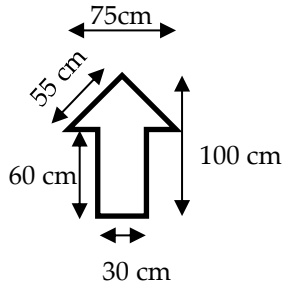
**Abbildung 4.4:** Links: Schematische Darstellung der Scantrajektorie beim Überstreichen über das Auge. Rechts: schematische Darstellung der Projektionsumgebung.

Aufgrund der oben genannten Einschränkungen hinsichtlich der Schreibgeschwindigkeit, kann die bei einer gegebenen Laserklasse maximal erzielbare Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Projektionslänge  $l_{\text{Proj}} (= s_1 + s_2 + \dots + s_n)$  und Frequenz  $f_{\text{frame}}$  ermittelt werden. Die Projektion eines Symbols mit der Seitenlänge  $s_1$  aus der Höhe  $h_{\text{Proj}}$  ist in **Abbildung 4.4**, rechts dargestellt. Die Pupille befindet sich in der Mitte des Öffnungswinkels der Projektion.

Eine realistische Größenordnung von Projektionslängen für einfache Symbole liegt bei wenigen Metern. Ein Pfeil mit einer Objektgröße



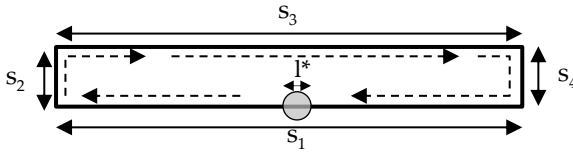
von 100 cm, wie in **Abbildung 4.5** dargestellt, weist eine Projektionslänge  $l_{\text{proj}}$  von 260 cm vor.



**Abbildung 4.5:** Länge der Scantrajektorie ( $l_{\text{proj}}$ ) für einen Pfeil der 100 cm lang und 75 cm breit ist.

Mehrere Symbole oder Schriften können schnell ein Vielfaches dieser Projektionslänge vorweisen.

Für die folgende Untersuchung wird eine Testgrafik verwendet, wie sie in **Abbildung 4.6** dargestellt ist. Die Länge der Projektion ( $l_{\text{proj}}$ ) setzt sich aus den Projektionsstrecken  $s_1$  bis  $s_4$  zusammen. Der Bereich der Projektion, in welchem sich die Pupille befindet ist grau dargestellt ( $l^*$  entspricht dabei dem auf die Straße projizierten Durchmesser der Pupille). Die Richtung der Scantrajektorie ist durch die gestrichelten Linien verdeutlicht.



**Abbildung 4.6:** Draufsicht auf eine längliche Testprojektion.

Um eine Projektion wie in **Abbildung 4.6** mit einem scannenden System zu projizieren, wird die Pupille bei einer Bildwiederholrate von 60 Hz etwa alle 0,167 s überstrichen. Für einen Beobachter, welcher von einem festen Ort in die Laserquelle schaut, ergibt sich eine scheinbar gepulste Lichtquelle (mit  $f_{\text{frame}} = 60 \text{ Hz}$ ).

Um die Gefahr für das Auge abschätzen zu können, müssen im vorliegenden Fall die Grenzwerte eines Einzelpulses ( $GZS_{\text{sp}}$ ) und der Grenzwert für den mittleren Wert einer Pulsfolge ( $GZS_{\text{pt}}$ ) bewertet werden. Der Grenzwert zulässiger Strahlung ( $GZS$ ) ist das Minimum aus diesen Werten:

$$GZS = \min \{GZS_{\text{sp}}, GZS_{\text{pt}}\} \quad (4.4)$$

Um diese Grenzwerte berechnen zu können, müssen die Pulsdauer  $t_p$ , der Korrekturfaktor für die scheinbare Größe der Lichtquelle  $C_6$  sowie die Zeitbasis  $T$  ermittelt werden. Die Pulsdauer  $t_p$  für einen Einzelpuls ist in diesem Fall (Pupille in der Mitte der Projektion, siehe **Abbildung 4.4**) durch:

$$t_p = \frac{R}{f_{frame}} = \frac{l^*}{l_{proj} \cdot f_{frame}} = \frac{h_{proj} \cdot D_{pup}}{d_{pup} \cdot l_{proj} \cdot f_{frame}} \quad (4.5)$$

gegeben, wobei R den Anteil des Lichtstroms beschreibt, der durch die Pupille geht. Der Durchmesser der Pupille ist durch  $D_{pup}$ , der Abstand der Pupille zur Lichtquelle durch  $d_{pup}$ , die Länge der Scantrajektorie durch  $l_{proj}$  und dem Abstand des Projektionssystems von der Projektionsfläche durch  $h_{proj}$  (vgl. **Abbildung 4.4**) gegeben.  $l^*$  ist dabei der auf den Boden projizierte Durchmesser der Pupille. Eine realistische Länge der Scantrajektorie liegt je nach projiziertem Symbol zwischen 0,1 m und 10 m, was bei einem Projektionsabstand  $h_{proj} = 1$  m zu Werten von R im Bereich zwischen 70 % und 0,7 % führt. Die sich hieraus ergebenden Pulsdauern liegen zwischen 116,7  $\mu$ s und 11,67 ms. Die scheinbare Größe der Lichtquelle hat ebenfalls einen Einfluss auf die Grenzwerte, da größere Abbildungen der Lichtquelle auf der Netzhaut zu geringeren Intensitäten der Strahlung führen. Die scheinbare Größe der Lichtquelle wird in [59] für scannende Lasersysteme mit einem Winkel von  $\alpha \approx 6^\circ$  beschrieben, was zu dem Korrekturfaktor

$$C_6 = \frac{\alpha}{\alpha_{min}} = \frac{6}{1,5} = 4 \quad (4.6)$$

für ausgedehnte Quellen führt.

T ist die für die Klassifikation zu wählende Zeitbasis und kann nach DIN EN 60825 mit  $T = 0,25$  s angegeben werden.

*Einzelpuls:* Der  $GZS_{sp}$  lässt sich für den relevanten Wellenlängenbereich (und den gegebenen Zeiten) durch:

$$GZS_{sp}(l_{proj}) = \frac{7 \cdot 10^{-4} \cdot t_p(l_{proj})^{0,75} \cdot C_6}{t_p} W \quad (4.7)$$

berechnen. Dabei wird die Pulsdauer in Abhängigkeit von der Länge der Projektionstrajektorie beschrieben ( $t_p(l_{proj})$ ).

*Pulsfolge:* Pulse, die innerhalb der Zeit  $T_i$  auf die Netzhaut treffen, werden als einzelner Puls gezählt. Für die hier relevanten Wellenlängen müssen Impulsgruppen unterhalb von  $T_i = 5 \mu s$  aufsummiert werden. Wie oben gezeigt, liegt die Pulsperiode bei 60 Hz bei 16,7 ms. Auch die einzelnen Pulsdauern liegen (bei den untersuchten Projektionslängen  $l_{proj}$ ) zwischen etwa 116,7  $\mu s$  und 11,67 ms weit über  $T_i$ . Hierbei wird angenommen, dass ein kontinuierlich emittierender Laser verwendet wird.

Der Grenzwert für eine Pulsfolge innerhalb der Dauer  $T$  ergibt sich zu:

$$GZS_{pt}(l_{proj}) = \frac{7 \cdot 10^{-4} \cdot (n \cdot t_p(l_{proj}))^{0,75} \cdot C_6}{T} W \quad (4.8)$$

mit:

$$n = T \cdot f_{frame} \quad (4.9)$$

Die maximal erlaubte Leistung lässt sich über die Relation mit dem Minimum der Grenzwerte (siehe (4.4)) zu:

$$P_{max} = \frac{GZS}{R} \quad (4.10)$$

berechnen. Die Beleuchtungsstärke ergibt sich über:

$$E(\lambda) = \frac{\Phi_{max}(\lambda)}{A} = \frac{P_{max} \cdot K_m \cdot V(\lambda)}{l_{proj} \cdot b_{proj}} \quad (4.11)$$

Die Breite der projizierten Trajektorie wird durch  $b_{proj}$  beschrieben. Mit der „Strichbreite“ von drei Millimetern kann die maximale Beleuchtungsstärke für ein scannendes System bestimmt werden.

*Verhalten bei Änderung der Projektionslänge*

Die maximale Beleuchtungsstärke für eine Pulsfolge (4.8) zeigt mit (4.5) folgende Abhängigkeiten:

$$E_{pt} \propto \frac{t_p^{0,75}}{l_{proj}} \propto \frac{1}{l_{proj} \cdot l_{proj}^{0,75}} = \frac{1}{l_{proj}^{1,75}} \quad (4.12)$$

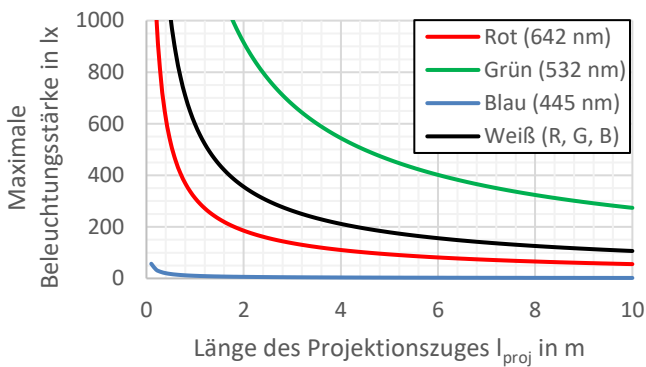
Für die Einzelpulsberechnung ergibt sich:

$$E_{sp} \propto \frac{t_p^{0,75}}{t_p \cdot l_{proj}} = \frac{1}{t_p^{0,25} \cdot l_{proj}} \propto \frac{l_{proj}^{0,25}}{l_{proj}} = \frac{1}{l_{proj}^{0,75}} \quad (4.13)$$

Die Beleuchtungsstärken für beide Berechnungen ( $E_{pt}$  für Pulstrain,  $E_{sp}$  für Single-Pulse) sinken für wachsende Projektionslängen.

In **Abbildung 4.7** sind die so ermittelten maximalen Beleuchtungsstärken für Laserklasse 2 bei einer scannenden Projektion für rotes (642 nm), grünes (532 nm), blaues (445 nm) sowie weißes Licht (R: G: B im Verhältnis 0,53: 0,28: 0,19) dargestellt. Mit blauem Licht

sind bereits ab vergleichsweise kurzen Projektionszügen (ca. 0,1 m) nicht mehr als 60 lx möglich. Mit grünem Licht können hingegen bei einer Projektionslänge von 1,7 m noch mehr als 1000 lx erzeugt werden.



**Abbildung 4.7:** Maximale Beleuchtungsstärke eines scannenden Systems für Laserklasse 2.

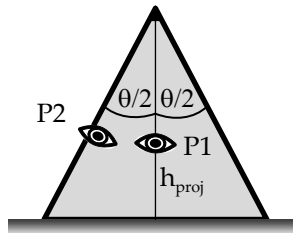
Bei der einfachen Darstellung eines Pfeils mit einer Projektionslänge von ca. 260 cm ergeben sich für eine grüne Beleuchtung des Pfeils etwas weniger als 700 lx. Diese hohe Beleuchtungsstärke reicht jedoch nicht aus, um eine solche Projektion tagsüber zu erkennen. Für eine Weißlichtmischung sind ca. 300 lx der Grenzwert. Für längere Projektionstrajektorien sind die erzielbaren Beleuchtungsstärken noch geringer. Bei Dämmerung sind diese Projektionen jedoch sehr gut zu sehen. Für die Darstellung einer flächigen Projektion benötigt

es bei diesem System extrem lange Projektionszüge. Dies führt zu einer starken Reduktion der Beleuchtungsstärke und kann somit nicht zielführend eingesetzt werden.

*Auswirkungen bei schräger Projektion und Positionierung des Auges am Rand des Projektionsfeldes*

Die vorhergehenden Abschätzungen beruhen auf den Vereinfachungen, dass eine senkrechte Abstrahlung nach unten geschieht. Darüber hinaus befindet sich das Auge in den bisher untersuchten Anwendungsfällen in der Mitte des Projektionskegels. Diese Einschränkungen sind im generellen nicht haltbar. Wie in **Abbildung 3.3** zu erkennen, ergeben sich für Position A, B oder C unterschiedliche Anbauhöhen und Projektionswinkel zur Straße (vergleiche z.B. Anbauort Außenspiegel (A) und Schweller (C)). Weiterhin ist es offensichtlich, dass sich das Auge auch am Rand des Projektionskegels befinden kann.

Im nächsten Abschnitt wird der Einfluss auf die maximal zulässige Strahlung bei einer Positionierung des Auges am Rand des Projektionsfeldes untersucht (vergleiche **Abbildung 4.8**).



**Abbildung 4.8:** Auge befindet sich in der Mitte des Projektionskegels (P1) und am Rand (P2).

Weiterhin wird analysiert, wie sich die maximale Beleuchtungsstärke ändert, wenn aus der „senkrechten Projektion“ (senkrechte Projektion meint in diesem Fall, dass die optische Achse des Projektionssystems parallel zur Flächennormalen des Projektionsfeldes ist) eine „schräge Projektion“ wird.

Durch eine solche Adaption ist die Winkelgeschwindigkeit des Spiegels für schräge Winkel (relativ zur Projektionsfläche) geringer als für eine senkrechte Projektion. Die für den Beobachter gefährlichste Stelle ist folglich am „Rand des Projektionskegels“ (P2 siehe **Abbildung 4.8**), da dort der meiste Lichtstrom pro Zeiteinheit in die Apertur des Auges fällt.

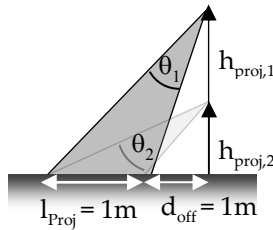
Durch die unterschiedliche maximal zulässige Strahlung ergibt sich für den vorliegenden Fall ( $l_{proj} = h_{proj} = 1\text{m}$ ,  $f = 60\text{ Hz}$ ):

$$\frac{E_{max}(\lambda, P2)}{E_{max}(\lambda, P1)} \approx 95\% \quad (4.14)$$



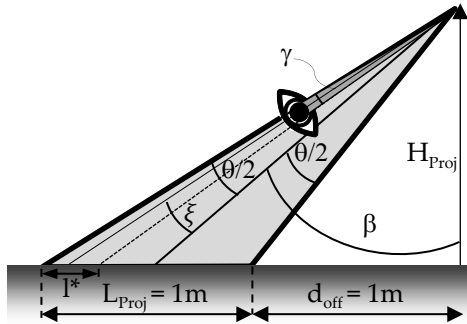
im sichtbaren Spektrum für Laserklasse 2. Folgend wird der Einfluss auf eine Projektion durch unterschiedliche Anbauhöhen ( $h_{\text{proj},x}$ ) des Projektionssystems evaluiert.

Die Größe ( $l_{\text{proj}}$ ) und der Abstand des Projektionsfeldes ( $d_{\text{off}}$ ) sowie die Bildwiederholrate ( $f$ ) bleiben hierbei konstant (siehe **Abbildung 4.9**).



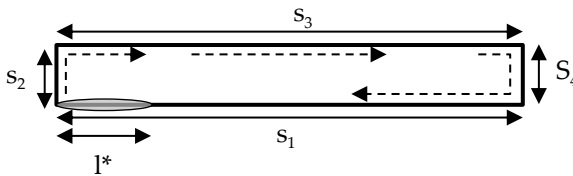
**Abbildung 4.9:** Variation der Projektionshöhe bei sonst gleichbleibenden Parametern bei einer schrägen Projektion.

Die zur Berechnung relevanten Maße sind in **Abbildung 4.10** zu sehen.  $\gamma$  gibt den Winkel des von dem Auge erfassten Bereichs an,  $\theta$  den gesamten Öffnungswinkel der Projektion,  $\beta$  den Winkel zwischen Flächennormalen und Winkelhalbierender des Projektionskegels,  $h_{\text{proj}}$  den Abstand von Projektionsfläche zu Projektionseinheit und  $l_{\text{proj}}$  die Länge des Projektionsfeldes.  $l^*$  gibt die auf die Projektionsfläche projizierte Länge der Pupille des Beobachters an.



**Abbildung 4.10:** Maße und Bezeichnungen der Winkel des Projektionskegels bei schräger Projektion sowie die angenommene Position des Auges.

Um die maximale Beleuchtungsstärke zu ermitteln, wird ein Testbild wie in **Abbildung 4.11** zu sehen ist, verwendet.



**Abbildung 4.11:** Draufsicht auf eine längliche Testprojektion.

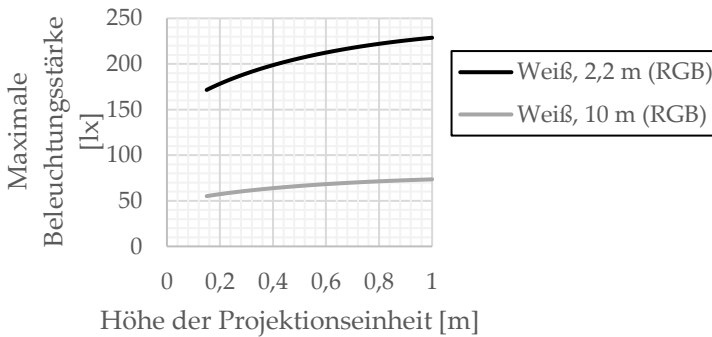
Die Testfigur weist eine Seitenlänge ( $s_1 = s_3$ ) von einem Meter vor. Die kurzen Seiten des Rechtecks sind mit  $s_1$  und  $s_2$  bezeichnet. Für den vorliegenden Fall wird angenommen, dass die Länge von  $s_2$  und  $s_3$

jeweils durch  $0,1 \cdot s_1$  gegeben ist. Somit ergibt sich die Gesamtlänge  $s$  der Projektion zu  $l_{proj} = 2,2 \cdot s_1$ . Dabei zeigt  $l^*$ , wie in **Abbildung 4.10** zu erkennen, die Projektion der Pupille auf das Projektionsfeld. Der Öffnungswinkel der Pupille ist durch  $\gamma$ , der Winkeloffset der Pupille von der optischen Achse der Projektion durch  $\xi$  gegeben. Der Winkel zwischen der Flächennormalen der Projektionsebene und der optischen Achse wird durch  $\beta$  beschrieben.

Die Zeit  $t_p$  eines Einzelpulses ist durch:

$$t_p = \frac{R}{f} = \frac{h_{proj} \cdot \left( \tan \left( \beta + \xi + \frac{\gamma}{2} \right) - \tan \left( \beta + \xi - \frac{\gamma}{2} \right) \right)}{l_{proj} \cdot f} \quad (4.15)$$

gegeben. Analog zu dem oben erläuterten Verfahren können die Grenzwerte maximal zulässiger Strahlung berechnet werden. In **Abbildung 4.12** ist die maximale Beleuchtungsstärke für unterschiedliche Anbauhöhen sowie verschiedene Projektionslängen  $l_{proj}$  dargestellt ( $s_1$  ist jeweils ein Meter). Für die 2,2 m lange Projektion ist somit die maximale Beleuchtungsstärke für diese Grafik durch etwa 230 lx (für weiß) gegeben (Pupille am Rand, senkrechte Projektion). Für eine geringere Anbauhöhe ( $h = 0,2$  m) sinkt der Wert auf 180 lx. Für längere Scantrajektorien (wie zum Beispiel Schriften,  $l_{proj} = 10$  m) sinkt die maximale Beleuchtungsstärke weiter ab ( $\approx 60$  lx – 70 lx).



**Abbildung 4.12:** Maximale Beleuchtungsstärken bei einer schrägen Projektion für unterschiedliche Anbauhöhen. Bei einer Projektionslänge  $l_{\text{Proj}} = 1 \text{ m}$  ( $s = 2,2$ ) und  $l_{\text{Proj}} = 22 \text{ m}$  ( $s = 22$ ).

#### 4.1.3 BELEUCHTUNGSSTÄRKE EINES RESONANT- QUASISTATISCHEN SCANNERS

Im Unterschied zu dem zuvor beschriebenen System (silhouettenförmige Projektion mit einem Vektorscan) werden resonant- quasistatische Scanner genutzt, um flächige Ausleuchtungen zu ermöglichen. In verschiedenen Veröffentlichungen [57, 59] werden die maximalen Lichtströme für resonant- quasistatische Systeme berechnet, die mit einem augensicheren System möglich sind. In den Arbeiten werden bei typischen Auslegungsparametern die maximalen Lichtströme für augensichere Projektionssysteme ermittelt. Dabei ergeben sich für eine Weißlichtprojektion maximale Lichtströme bis zu 20 lm. Bei einer quadratischen Projektionsfläche mit einer Kantenlänge von 0,5 m ergäbe sich demnach eine Beleuchtungsstärke von ca. 100 lx.

#### 4.1.4 BELEUCHTUNGSSTÄRKE EINES FLÄCHENLICHT- MODULATORS

Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch die Kombination von RGB-Laserdioden mit Flächenlichtmodulatoren. Auch diese Systeme wurden bereits in [60] hinsichtlich der Grenzen, welche sich durch die Augensicherheit ergeben, untersucht. Wenn diese Systeme einen Diffusor beinhalten, können sie einen Lichtstrom bis zu 20 lm in der Laserklasse 1 und innerhalb der Laserklasse 2 mehr als 250 lm zur Verfügung stellen. Auf einem Feld mit einer Größe von 0,25 m<sup>2</sup> können somit ca. 1000 lx in weiß erzielt werden.

#### 4.1.5 FAZIT ZUR AUGENSICHERHEIT

In diesem Kapitel wurden die Projektionssysteme in drei verschiedene Arten der Bilderzeugung unterteilt:

- *Flächenlichtmodulator*
- *Resonant- quasistatischer Scan*
- *Vektorscan*

*Flächenlichtmodulatoren* mit einer Beleuchtung durch Laserlicht können innerhalb der zweiten Klasse mehr als 250 lm erzeugen. Designprojektionen (> 15 lm) und Sicherheitsprojektionen bei Nacht (> 98 lm) können somit von diesem System dargestellt werden.

Der Grenzwert für *resonant-quasistatische Systeme* wird in der Literatur zu ca. 20 lm angegeben. Somit können kleine Designprojektionen (< 15 lm) mit diesen Systemen ermöglicht werden.

Der *Vektorscanner* ist in der Lage, silhouettenförmige Bilder zu projizieren. Für größere Projektionslängen ergeben sich geringere maximale Beleuchtungsstärken, die augensicher sind. Um Symbole mit einer Projektionslänge zwischen zwei und vier Metern darzustellen, sind ca. 340 lx ( $I_{\text{proj}} = 2\text{m}$ ) bis 200 lx ( $I_{\text{proj}} = 4\text{m}$ ) in weiß möglich. Dies reicht für Designprojektionen und nächtliche Sicherheitsprojektionen.

Vektorscanner können im optimalen Bereich ( $I_{\text{proj}} < 3\text{m}$ ) etwas höhere Beleuchtungsstärken als Flächenlichtmodulatoren erzielen. Letztere sind jedoch in ihrer Funktionalität leicht überlegen, da sie flächige Projektionen (siehe **Abbildung 4.2**) ebenso realisieren. Beleuchtungsstärken, die bei Tag sichtbar sind und dabei eine Mindestgröße der Projektion vorweisen, sind nach **Abbildung 4.7** mit einem Vektorscanner nicht möglich. Die hierfür erforderlichen Beleuchtungsstärken (17 000 lx) werden erst in Bereichen erreicht, die eine sinnvolle Nutzung ausschließen ( $I_{\text{proj}} < 1\text{cm}$ ).

Bei Nutzung von ausschließlich grünem Licht, ergeben sich höhere Beleuchtungsstärken. Da dies aktuell nicht zulassungsfähig ist, wurde dieser Fall jedoch nicht betrachtet.

## 4.2 WAHRNEHMBARKEIT DES REGENBOGENEFFEKTES

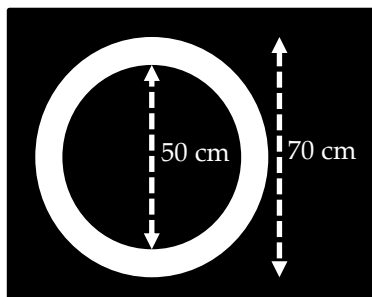
Regenbogeneffekte sind bei Projektoren mit sequentieller Beleuchtung ein bekanntes Phänomen (siehe 3.6). Wenn dieser Effekt zu stark in den Vordergrund tritt, kann er als störend / nicht wertig wahrgenommen werden. Wie stark dieser Effekt von einem Beobachter wahrgenommen wird, hängt von diversen Faktoren ab. Einige dieser Faktoren sind: die Frequenz der einzelnen Farbbilder pro Sekunde (Colorframes pro Sekunde, cf/s), die Geometrie der Projektion, der Unterschied der Umgebungsleuchtdichte zur Leuchtdichte der Projektion und Sehwinkel unter welcher der Beobachter die Projektion sieht etc.. Weiterhin nehmen Menschen diese Effekte unterschiedlich stark wahr.

Die unterschiedlichen Technologien weisen verschiedene maximale Schaltgeschwindigkeiten der einzelnen Pixel vor. Systeme, die zur Modulation des Bildinhaltes Flüssigkristalle nutzen, haben typischerweise eine geringere Schaltgeschwindigkeit als beispielsweise ein DMD-Bildgeber [61].

#### 4.2.1 STUDIE ZUR WAHRNEHMBARKEIT DES REGENBOGENEFFEKTES

Im Folgenden soll evaluiert werden, ob die konventionellen Systeme (Flüssigkristall/ DMD) in einer für Umfeldprojektionen voraussichtlich typischen Situation einen stark sichtbaren/ störenden Regenbogeneffekt bei dem Beobachter hervorrufen.

In einer Expertenstudie wurden zwei Systeme an der unteren Grenze der Anforderungen hinsichtlich der Erkennbarkeit des Regenbogeneffektes untersucht. Dabei stellte das erste System eine Bildwiederholrate von 240 Hz, während das zweite System eine Wiederholrate von 720 Hz zur Verfügung stellte. Zur Überprüfung der Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes wurden dabei Produkte aus dem Verbrauchermarkt gewählt, da diese in ihrer Modulation bereits ein optimiertes System darstellen. Die dargestellte Projektion war ein weißer Kreis mit einem Innendurchmesser von 50 cm und einem Außendurchmesser von 70 cm (siehe **Abbildung 4.13**).



**Abbildung 4.13:** Maße des gewählten Projektionsinhaltes.



Der Kreis wurde gewählt, weil dieser keine Vorzugsrichtung vorweist und einen hohen Kontrast zur Verfügung stellt. Dabei wurde der Test bei niedrigen Umgebungsbeleuchtungsstärken (0 - 200 lx) durchgeführt. Die Projektion wies eine Beleuchtungsstärke von einmal 60 lx und einmal 100 lx vor. Die Farbdarstellung der verschiedenen kommerziell erhältlichen Projektoren ist in **Tabelle 4.3** zu sehen.

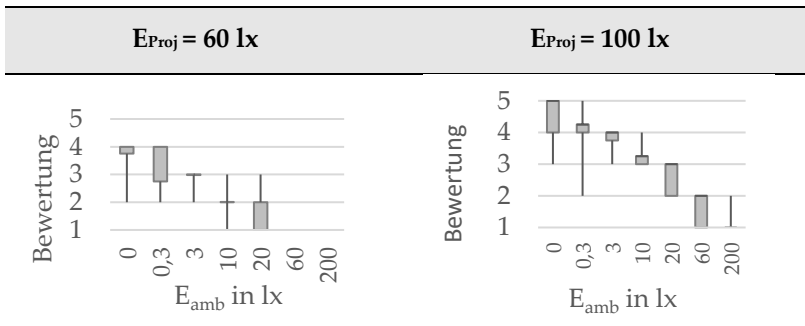
**Tabelle 4.3:** Vergleich der Arbeitsweise der unterschiedlichen Projektoren.

Technologie	Frame-rate	Farbsequenzen	Color-framerate
DMD, Farbrad	120 Hz	6 (RYGCWB)	720
LCoS sequentiell	60 Hz	4 (RGBG)	240

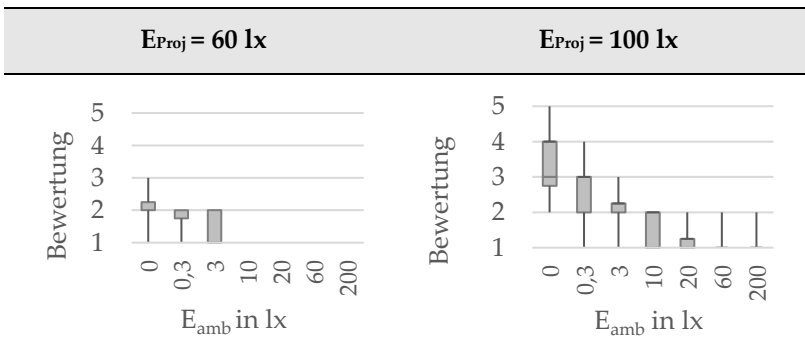
Im Hinblick auf die Ergebnisse muss hier einschränkend erwähnt werden, dass nicht mit identischen Farbzusammensetzungen gearbeitet wurde, was einen Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit der Effekte hat. Die acht Probanden standen ca. einen Meter von der Projektion entfernt. Vor der Studie wurde explizit auf den Regenbogeneffekt hingewiesen, da dieser in der Anwendung möglichst auch von Personen, die den Effekt kennen, nicht wahrgenommen werden sollte. Die Probanden waren im Alter zwischen 20 und 46 Jahren mit einem Durchschnittsalter von ca. 30 Jahren. Auf einer Skala von 1 bis 5 (1: Effekt nicht Wahrnehmbar, 3: Effekt wahrnehmbar aber nicht / kaum störend; 5: Effekt extrem auffällig und störend) sollten die Probanden den Effekt bei unterschiedlichen Umgebungsbeleuchtungsstärken  $E_{\text{am}}$  (0 lx; 0,3 lx; 3 lx; 10 lx; 20 lx; 60 lx; 200 lx)

bewerten. Dabei wurde die Umgebungsbeleuchtungsstärke in unterschiedlicher Reihenfolge verändert. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 4.4** und **Tabelle 4.5** für das System mit einer Bildwiederholrate von 240 Hz respektive 720 Hz dargestellt.

**Tabelle 4.4:** Bewertung der Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes bei einer Colorframerate von 240 Hz.



**Tabelle 4.5:** Bewertung der Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes bei einer Colorframerate von 720 Hz.



#### 4.2.2 FAZIT REGENBOGENEFFEKT

Für Umgebungsbeleuchtungsstärken bis zu 3 lx ist einem Großteil der Probanden für jegliche Systeme der Regenbogeneffekt aufgefallen. Bei einer Colorframerate von 240 Hz konnten die Probanden bei den niedrigen Umgebungsbeleuchtungsstärken den Effekt sehr gut erkennen und empfanden ihn als störend. Ab Umgebungsbeleuchtungsstärken von 60 lx war der Effekt für das LCoS-System ( $E_{\text{Proj}} = 60 \text{ lx}$ ) nicht mehr wahrnehmbar.

Die besten Ergebnisse liefert erwartungsgemäß das System mit 720 cf/s bei  $E_{\text{Proj}} = 60 \text{ lx}$ . Auch bei tiefen Umgebungsbeleuchtungsstärken von 0 – 0,3 lx liegen die Bewertungen im Mittel bei ca. zwei. Ab 10 lx Umgebungsbeleuchtungsstärke (Straßenlaterne) sind bei  $E_{\text{Proj}} \leq 100 \text{ lx}$  jegliche Bewertungen der Probanden kleiner oder gleich zwei gewesen und als wenig störend beschrieben worden.

Das System erfüllt die Anforderungen (Symbol = ✓), wenn bei allen gegebenen Umgebungsbeleuchtungsstärken das oberste Quartil der Probanden den Regenbogeneffekt mit maximal drei oder weniger bewertet haben.

Ein System erfüllt teilweise die Anforderungen (Symbol = 0), wenn das oberste Quartil der Probanden ausschließlich bei Umgebungsbeleuchtungsstärken von 10 lx und weniger die Wahrnehmung des Effektes mit einem Wert größer als drei bewertet hat.

Ein System erfüllt nicht die Anforderungen, wenn das oberste Quartil der Probanden bei Umgebungsleuchtdichten größer oder gleich 10 lx einen Wert von größer als drei angegeben hat.

**Tabelle 4.6:** Zusammenfassung der Ergebnisse, wobei ✓ bedeutet, dass das System den Anforderungen entspricht, ✗ weist darauf hin, dass das System nicht den Anforderungen genügt und 0 weist darauf hin, dass das System für gewisse Umgebungsbeleuchtungsstärken  $E_{amb}$  die Anforderungen erfüllen kann, jedoch nicht für alle  $E_{amb}$ .

cf/s	$E_{Proj}$ 60 lx	$E_{Proj}$ 100 lx
720	✓	0
240	0	✗

Bei einer Projektion von ca. 60 lx erfüllt das DMD-System die Anforderungen. Das LCoS-System erfüllt diese hingegen nur teilweise. Nur in Situationen, in denen kaum Umgebungslicht in der Nähe des Fahrzeugs ist, fällt der Effekt auf. Bei höheren Beleuchtungsstärken der Projektion ist der Regenbogeneffekt hingegen bereits bei Straßenlaternenlicht (10 lx) sichtbar und wird als teilweise störend empfunden. Dies ist bei der DMD-Projektion nicht der Fall. Eine Dimmung der Projektion oder geringe Kontraste können Abhilfe leisten.

## Kapitel 5

# DIE STRAÙE ALS PROJEKTIONSFLÄCHE FÜR POLARISIERTES LICHT

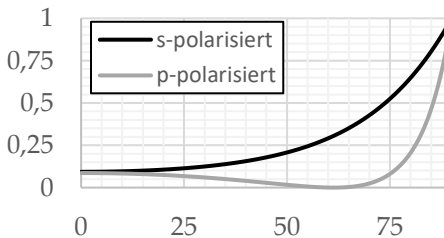
Durch die Straße als Projektionsfläche ergeben sich neue Rahmenbedingungen für Projektionssysteme, die beispielsweise im Bereich der Heimkinoprojektion nicht beachtet werden müssen. Bei Projektionen um das Fahrzeug handelt es sich in den meisten Fällen um eine schräge Projektion. Weiterhin ist der Asphalt nicht für Projektionen optimiert. In diesem Kapitel wird der Einfluss der Polarisation bei schräger Projektion auf die Straße untersucht.

In **Tabelle 5.1** ist ein Überblick über die Systeme dargestellt, welche in ihrer Grundkonfiguration polarisiertes Licht emittieren.

**Tabelle 5.1:** Kennzeichnung der Systeme, welche polarisiertes Licht emittieren.

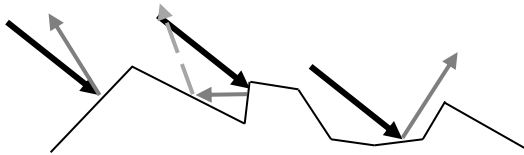
System	Emittiert polarisiertes Licht
DMD (LED)	X
Laserscanner (emittiert kohärentes Licht)	✓
LCD-Systeme (LED/ LASER)	✓
LCoS-System (LED/ LASER)	✓
Mikro-LED	X
Laser Phosphor	X

Aus den fresnelschen Formeln folgen unterschiedliche Reflexionsspektren für s- bzw. p-polarisiertes Licht. In **Abbildung 5.1** sind die Reflexionskoeffizienten für die verschiedenen Polarisationsrichtungen für unterschiedliche Einfallswinkel dargestellt. Dabei fällt Licht von Medium 1 ( $n_1$ ) unter gegebenem Winkel in Medium 2 ( $n_2$ ).



**Abbildung 5.1:** Reflexionskoeffizient für s- und p-polarisiertes Licht. Der Brechungsindex des ersten Mediums beträgt  $n_1=1$ , der des zweiten beträgt beispielhaft  $n_2=1,83$ .

Im Brewsterwinkel ergibt sich für die p-polarisierte Komponente ein Reflexionskoeffizient von null, während die s-polarisierte Komponente immer zu einem gewissen Grad reflektiert wird. Aufgrund der Oberflächenrauheit einer Fahrbahn wird ein Verlauf, wie er in **Abbildung 5.2** dargestellt ist, auf makroskopischer Ebene nicht erreicht. Durch die Vielzahl an Reflexionswinkeln, die sich durch die unterschiedliche Anordnung der verschiedenen Facetten der Straße ergeben, wird eine Vielzahl von Streuwinkeln erzeugt.



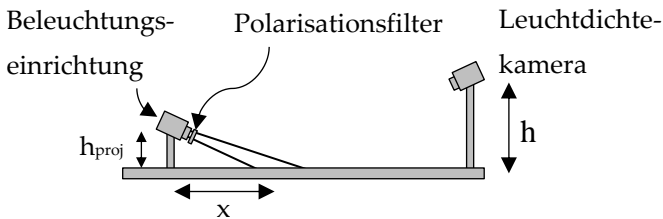
**Abbildung 5.2:** Schematische Darstellung von einfallendem Licht (schwarz) auf eine raue Oberfläche. Für die gleiche Einfallrichtung ergeben sich hier drei unterschiedliche Streurichtungen für das reflektierte Licht (grau und grau gestrichelt nach der zweiten Reflexion).

Je nach Strukturierung der Oberfläche ergeben sich unterschiedliche Reflexionsspektren. Um den Einfluss polarisierten Lichts in der Praxis abschätzen zu können, wurden unterschiedliche Messungen vorgenommen.

## 5.1 STUDIE ZUR POLARISATION

Der Versuchsaufbau ist in **Abbildung 5.3** dargestellt. Dabei projiziert die Beleuchtungseinrichtung (LED und Kollimationsoptik) einen

Lichtkegel auf die Straße. Vor der Lichtaustrittsöffnung kann ein Polarisationsfilter angebracht werden. Somit kann s-, wie auch p-polarisiertes Licht generiert werden. Mit einer Leuchtdichtekamera wird die Leuchtdichte der Projektion vermessen.



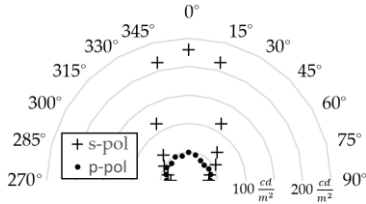
**Abbildung 5.3:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Dabei wird die Leuchtdichtekamera mit der Höhe  $h$  in unterschiedlichen Azimutwinkeln positioniert und die auf der Straße generierte Leuchtdichte gemessen. Im vorliegenden Fall wurde die Kamera in einer Höhe  $h=170$  cm im Abstand von drei Metern zum Referenzpunkt, welcher sich im Abstand  $x=20$  cm von der Beleuchtungseinrichtung befindet, aufgebaut. Die Höhe der Projektionseinheit ist mit  $h_{\text{proj}} = 12$  cm gegeben. Die Ursprungsachse des Polarkoordinatensystems befindet sich auf der Verbindungsachse zwischen Beleuchtungseinrichtung und dem Referenzpunkt. Die Messpunkte befinden sich in  $15^\circ$ -Abständen.

*Ergebnisse:*



Für s-polarisiertes wie auch p-polarisiertes Licht sind die Messergebnisse in **Abbildung 5.4** dargestellt.



**Abbildung 5.4:** Leuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$  für unterschiedliche Winkel für s-polarisiertes (Kreuz) und p-polarisiertes (Kreis) Licht.

Bei dem im Experiment vorliegenden Straßenbelag ist eine starke Abhängigkeit der Reflexionsspektren von der Polarisation festzustellen. Darüber hinaus wurden weitere Straßen für  $0^\circ$  subjektiv untersucht. Hierbei war der Aufbau jeweils identisch. Bei der Drehung des Filters war eine deutliche Abnahme der Leuchtdichte zu erkennen. Alle untersuchten Beläge (Straßen, Fahrradwege) zeigten einen ähnlichen Effekt wie der Straßenbelag im Lichtkanal. Es ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung. Der spekulare Anteil (bei  $0^\circ$ ) des s-polarisierten Lichtes weist im durchgeführten Experiment einen Peak von ca.  $230 \text{ cd/m}^2$ , der spekulare Anteil des p-polarisierten Lichtes hat sein Maximum ( $0^\circ$ ) bei ca.  $50 \text{ cd/m}^2$ . Somit ergibt sich ein Unterschied der Leuchtdichte mit einem Faktor von ca. 4,6 zwischen den beiden Polarisationsrichtungen. Dieser Effekt ist gut mit dem Auge erkennbar. Der diffuse Anteil (Wert der Leuchtdichte

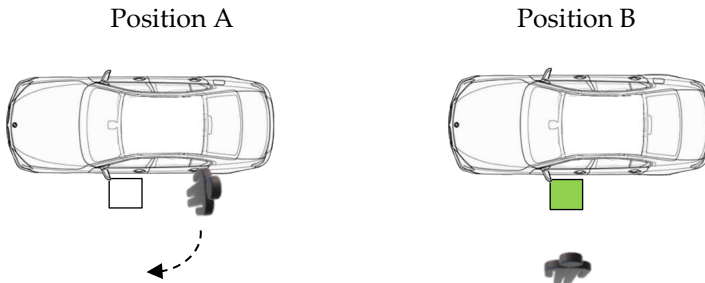
im Winkel von  $90^\circ$  und  $270^\circ$ ) liegt für beide Polarisationsrichtungen bei etwa  $35 - 40 \text{ cd/m}^2$ .

### 5.1.1 FAZIT UND FOLGEN DER POLARISATIONSABHÄNGIGKEIT BEI PROJEKTIONEN AUF DER STRAÙE

Bei einer schrägen Projektion mit polarisiertem Licht auf eine Straße, ist die s-polarisierte Komponente die stärker reflektierte und kann somit aus bestimmten Betrachtungswinkeln besser wahrgenommen werden. Dies muss bei der Auslegung von Projektionssystemen, welche polarisiertes Licht emittieren, beachtet werden. Bei RGB-Projektionssystemen, die beispielsweise nur eine s-polarisierte Komponente und eine p-polarisierte Komponente emittieren, können ungewünschte Farbeffekte auftreten.

Die praktischen Auswirkungen dieses Effektes sind in **Abbildung 5.5** dargestellt. Ein Beobachter befindet sich zunächst in Position A ( $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$  zur optischen Achse des Projektionssystems (vgl. **Abbildung 5.4**)). Die Anteile des gestreuten Lichts für die s-polarisierte Komponente sowie für die p-polarisierte Komponente sind ähnlich. Alle Farbkomponenten werden somit näherungsweise unabhängig ihrer Polarisation zum Beobachter gestreut. Wenn der Beobachter um das projizierte Bild herumläuft (durch den gestrichelten Pfeil in der Abbildung angedeutet) verschiebt sich die Farbkoordinate in Richtung der s-polarisierten Komponente(n). Im Fall, dass die grüne

Komponente s-polarisiert ist, ergibt sich somit ein grüner Bildeindruck für den Beobachter in Position B.



**Abbildung 5.5:** Farbwahrnehmung durch einen Betrachter einer Projektion (kleines Rechteck neben dem Fahrzeug) aus unterschiedlichen Beobachtungswinkeln (Position A und Position B). Bei einer Zusammensetzung des weißen Lichts aus zwei p-polarisierten Komponenten (rot und blau) und einer s-polarisierten Komponente (grün) kann aus der Position B ein grüner Bildeindruck entstehen, während in Position A ein weißer Bildeindruck entsteht.

Dieser Effekt kann bei 3-Chip-LC-Systemen (LCoS oder LCD), wie auch bei Systemen die Laserlicht emittieren, auftreten. Bei LC-LED-Projektionssystemen mit einem einzelnen Bildgeber sind die Polarisationen parallel und es entstehen keine Farbeffekte.

Für einen beispielhaften Fall ( $\lambda_r= 642 \text{ nm}$ ,  $\lambda_g= 532 \text{ nm}$  und  $\lambda_b= 445 \text{ nm}$  ergibt sich bei einem Verhältnis von 0,53: 0,28: 0,19 der Weißpunkt zu  $x= y= 0,33$  und Aufbau vergleichbar zu **Abbildung 5.3**) sind die möglichen Farbkoordination in **Tabelle 5.2** dargestellt.

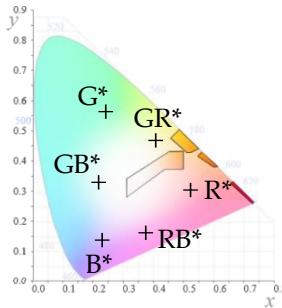
Unter der Annahme, dass zwei der drei Komponenten p-polarisiert sind und die dritte Komponente s-polarisiert ist, wird für einen Beobachtungswinkel von  $0^\circ$  die s-polarisierte Komponente stärker wahrgenommen als die p-polarisierten Komponenten (die s-polarisierte Komponente ist aus dem Beobachtungswinkel  $0^\circ$  ca. 4,5-mal stärker wahrnehmbar). Eine Mischfarbe ergibt sich, falls zwei der drei Komponenten s-polarisiert sind. Der reflektierte Farbwert (für eine Situation analog zum Experiment) ist in **Tabelle 5.2** dargestellt.

**Tabelle 5.2:** Anteil der unterschiedlichen Wellenlängen um den Punkt  $x= y= 0,33$  zu erzeugen. Die nicht aufgeführten Komponenten sind p-polarisiert.

Bezeichnung	s-polarisierte Komponente (n)	(x, y) – Koordinate nach Reflexion
R*	642 nm	(0,53; 0,31)
G*	532 nm	(0,25; 0,57)
B*	445 nm	(0,23; 0,15)
RG*	642 nm und 532 nm	(0,41; 0,47)
RB*	642 nm und 445 nm	(0,38; 0,19)
GB*	532 nm und 542 nm	(0,21; 0,34)

---

Die Werte aus **Tabelle 5.2** sind ebenfalls in **Abbildung 5.6** dargestellt. Für die unterschiedlichen Kombinationen ergeben sich starke Farbshifts. Diese sind gut sichtbar und außerhalb der ECE-Farbgrenzen. Für größere Winkel (insbesondere im Bereich  $90^\circ$ - $180^\circ$ ) wird dieselbe Projektion als „weiß“ wahrgenommen.



**Abbildung 5.6:**  $(x, y)$  - Koordinaten für unterschiedliche Zusammensetzungen der Polarisation des emittierten Lichtstromes.

Somit ergibt sich für den Beobachter je nach Perspektive eine stark unterschiedliche Farbe. Bei der Auslegung des optischen Systems ist somit auf die parallele Anordnung der Polarisationen zu achten, da diese Farbeffekte bei einer parallelen Auslegung nicht auftreten.

Dieser Effekt kann ebenso genutzt werden. Beispielhaft bei Projektionen die nur für den Fahrer sichtbar sein sollen. Damit der Gegenverkehr möglichst wenig von der Projektion sieht und diese nicht ablenkt, kann die p-polarisierte Komponente für solche Projektionen genutzt werden. Wenn die Projektion für andere Verkehrsteilnehmer gut sichtbar sein soll, sollte eher die s-polarisierte Komponente gewählt werden.

## Kapitel 6

# EVALUATION KLEINER PROJEKTIONS- SYSTEME UND AUSWAHL GEEIGNETER KONZEPTE

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften unterschiedlicher Systeme hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für Umfeldprojektionen bewertet. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die *Effizienz* bzw. den erzielbaren Lichtstrom, die *thermischen Randbedingungen* und die *Abbildungsqualität* gelegt. Bei jeglichen Analysen steht die Auslegung des Systems für einen kleinen Bauraum im Vordergrund. Zu bewerten sind die unterschiedlichen Kollimatoren, Polarisatoren, Bildgeber und das abbildende System. Dabei können unterschiedliche Systeme aus den Komponenten gebildet werden (siehe **Abbildung 6.1**).

Lichtquelle	+	bildgebendes Element	
LED, weiß	+	DMD	subtraktiv
LASER, monochromatisch		LCD (+ Polarisator)	
phosphorkonvertierter Laser		LCoS (+ Polarisator)	
LED, RGB		Mikrospiegel	
Laserlicht, RGB	=	segmentierte LED	additiv
segmentierte LED			

**Abbildung 6.1:** Unterschiedliche Lichtquellen wie Bildgeber. Aus der Kombination der unterschiedlichen Komponenten bestehen die Systeme.

## 6.1 EFFIZIENZ- UND BAURAUUMUNTERSUCHUNG

Die Gesamteffizienz eines Projektionssystems ist stark von der Étendue der Lichtquelle abhängig. Bei gegebener Lichtquellengröße und kleiner werdendem Bauraum sinkt die Gesamteffizienz (im Falle einer gleichbleibender F-Zahl) des Systems. Ziel ist es, die unterschiedlichen Projektionssysteme hinsichtlich dieser Faktoren einordnen zu können. Ebenso soll ermittelt werden, welche Lichtströme für kleine Systeme erreicht werden können.

In **Tabelle 6.1** sind die notwendigen (bzw. typischerweise genutzten) Komponenten für ein Projektionssystem dargestellt.

**Tabelle 6.1:** Überblick über die notwendigen optischen Komponenten der verschiedenen Systeme.

Bildgeber	Beleuchtungsoptik	Polarisator/ Analysator	Abbildungsoptik
DMD	✓	✗	✓
LCoS	✓	✓	✓
LCD	✓	✓	✓
Laserscanner	✓	✗	✗
Laserscanner + Phosphor- konverter	✓	✗	✓
Segmentierte LED	✗	✗	✓

Bis auf die segmentierte LED kann in jeglichen Systemen eine Beleuchtung bzw. Kollimationsoptik eingesetzt werden. Eine Polarisation ist bei LC-Systemen notwendig. Wenn polarisiertes Licht bereits von der Quelle emittiert wird (Laser), kann (bei einer Amplitudenmodulation) dennoch nicht auf einen Analysator verzichtet werden. Für alle Systeme, außer dem laserscannenden System (kein Phosphorkonverter), ist eine Abbildung durch eine Projektionsoptik notwendig.

Die Effizienz- und Bauraumanalyse gliedert sich in mehrere Teile. Im ersten Unterkapitel (6.1.1) werden die unterschiedlichen *Beleuchtungssysteme* hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht und verglichen. Der Einfluss verschiedener *Polarisatoren* in 6.1.2 evaluiert. Zusammen



mit den in Abschnitt 6.1.1 und 6.1.2 gewonnenen Erkenntnissen, werden in 6.1.3 die unterschiedlichen *Gesamtsysteme* hinsichtlich ihrer Effizienz für verschiedene Bauräume untersucht.

### 6.1.1 BELEUCHTUNGSOPTIK/ KOLLIMATION

Die Kollimation einer Lichtquelle lässt sich grob in drei Kategorien einteilen:

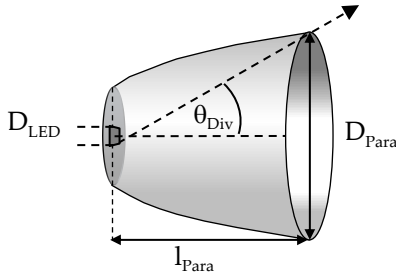
- *Reflektives System*
- *Refraktive Optik*
- *TIR-Optik*

Die unterschiedlichen Möglichkeiten weisen unterschiedliche Vor- bzw. Nachteile vor.

Die TIR-Optik beschreibt dabei eine Mischung aus den ersten beiden Systemen.

#### *Reflexionssystem*

Zunächst wird ein rein reflektives System untersucht. In diesem (**Abbildung 6.2**) geschieht die Kollimation nicht über Brechung und es treten somit keine Dispersionseffekte auf. Darüber hinaus ist die Effizienz eines solchen Systems sehr hoch.



**Abbildung 6.2:** Paraboloider Reflektor zur Kollimation des Lichtes.

Nachteilhaft ist der große Bauraum, der bei der Erzeugung kleiner Divergenzwinkel benötigt wird. Aus der 2D-Étenduebetrachtung ergibt sich für den Radius eines Paraboloidreflektors mit runder Apertur und einem Lambert-Strahler als Quelle folgende Abhängigkeit von dem Divergenzwinkel  $\theta_{Div}$  und der Seitenlänge der LED  $D_{LED}$ :

$$D_{para} = \frac{D_{LED} \cdot \sqrt{2}}{\sin(\theta_{Div})} \quad (6.1)$$

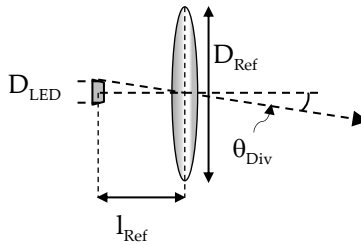
Der Faktor  $D_{LED} \cdot \sqrt{2}$  gibt den maximalen Durchmesser der (quadratischen) LED an. Aus geometrischen Betrachtungen folgt für die Länge  $l_{Para}$  des Systems:

$$l_{Para} = \frac{D_{LED}}{\sqrt{2}} \left( \frac{\sin(\theta_{Div}) + 1}{\sin(\theta_{Div}) \cdot \tan(\theta_{Div})} \right) \quad (6.2)$$

Der Zusammenhang der notwendigen Länge  $l_{\text{Para}}$  und Divergenz nach der Kollimation ist in **Abbildung 6.4** dargestellt.

### *Refraktives System*

Für die Abschätzung der Größe eines einfachen refraktiven Kollimationssystems wird angenommen, dass die Ausdehnung  $l_{\text{ref}}$  (entlang der optischen Achse) durch die Brennweite gut wiedergegeben wird, da sich die Lichtquelle für eine Kollimation im Brennpunkt der Linse befinden sollte.



**Abbildung 6.3:** Refraktive Kollimation, dargestellt durch eine einzelne Linse.

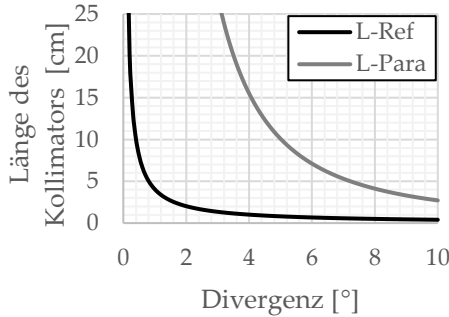
Für den Durchmesser der Linse  $D_{\text{ref}}$  folgt:

$$D_{Ref} = \frac{\sqrt{2} \cdot D_{LED}}{\sin(\theta_{Div})} \quad (6.3)$$

Die Gesamtlänge des Kollimationssystems ist durch:

$$l_{Ref} = \frac{D_{LED}}{\sqrt{2} \cdot \tan(\theta_{Div})} \quad (6.4)$$

gegeben. In **Abbildung 6.4** ist der graphische Zusammenhang zwischen Divergenzwinkel  $\theta_{\text{Div}}$  nach der Kollimation und Systemlänge  $l_{\text{Ref}}$  bzw.  $l_{\text{Para}}$  zu sehen.



**Abbildung 6.4:** Zusammenhang zwischen Divergenz nach der Kollimation und Größe des Systems.

Bei dieser Auslegung des Systems ist es jedoch so, dass die Effizienz  $\eta_{\text{Koll}}$  durch den Sammelwinkel  $\alpha$  der Optik begrenzt wird:

$$\eta_{\text{Sammel}} = \frac{\phi_{\text{Linse}}}{\phi_{\text{LED}}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\alpha I \cdot \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\alpha I \cdot \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \sin(\alpha)^2 \quad (6.5)$$

Die Effizienz des Kollimationssystems hängt von der expliziten Auslegung der Optik ab und kann somit nicht abschließend beurteilt werden. Sie ist jedoch in vielen Fällen geringer als die eines Paraboloidreflektors.

### *TIR-Optik*

Bei der Verwendung einer TIR-Linse werden die Vorteile der beiden oben genannten Systeme kombiniert. Die Kollimation geschieht bei diesem System über Totalreflexion für große Divergenzwinkel und über Brechung der Linse für Licht kleinerer Divergenzwinkel, bzw. für bereits reflektiertes Licht.

Die Effizienz ist im Allgemeinen höher als bei einer einzelnen, refraktiven Optik, die Homogenität der Ausleuchtung ist jedoch vergleichsweise gering (siehe Kapitel 7.1).

### *Vergleich der Kollimationssysteme*

Es wird angenommen, dass der Durchmesser des Kollimators  $D_{\text{Koll}}$  mit dem Durchmesser des Bildgebers  $D_{\text{Im}}$  und dem der Projektionslinse  $D_{\text{Proj}}$  skaliert. Bei gegebener F-Zahl der Projektionslinse skaliert somit das gesamte System ebenfalls in der Länge (entlang der optischen Achse). Um kleine Projektionssysteme zu ermöglichen, sollten somit Durchmesser wie auch Länge des Kollimationssystems nicht zu groß werden. Für einen Vergleich der unterschiedlichen Beleuchtungssysteme in einem anwendungsnahen Fall wird  $D_{\text{Koll}} = 10 \text{ mm}$  gewählt. Bei der Nutzung einer LED mit Seitenlängen  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ergibt sich ein Divergenzwinkel von ca.  $\pm 8^\circ$ . Um diese Divergenz zu ermöglichen, sind unterschiedliche Längen der Systeme notwendig. Diese Werte sind in **Tabelle 6.2** dargestellt.

**Tabelle 6.2:** Vergleich der notwendigen Kollimationslänge unterschiedlicher Systeme.

Kollimation	Länge des Systems
Paraboloid Reflektor	$\approx 41$ mm
Refraktive Optik	$\approx 5$ mm
TIR Optik	5 mm – 41 mm

---

Der rein reflektive Ansatz des Paraboloidreflektors benötigt einen um Faktoren größeren Bauraum, als die alternativen Systeme. Da der Bauraum ein essentieller Faktor ist, wird diese Art der Kollimation nicht weiter betrachtet. Einzel- wie auch mehrstufige Kollimation durch eine refraktive Optik und die Kollimation durch eine TIR-Optik kombinieren eine gute Kollimation mit geringen Bauräumen und werden somit für den Prototypenaufbau (siehe Kapitel 7.1) näher untersucht.

### 6.1.2 POLARISATOREN

Die Effizienz der Polarisatoren ist stark von der Divergenz des einfallenden Lichtes abhängig. Wie zuvor erläutert, sind in den Dimensionen für kleine Projektoren Divergenzwinkel  $\pm 8^\circ$  möglich. Wie in B.2.2 beschrieben, sind für Einfallswinkel größer als  $\pm 5^\circ$  bereits Effizienz-

verluste durch die Polarisatoren zu erwarten. Weiterhin sind Farbefekte für dielektrische Polarisatoren nicht ausgeschlossen. Im Gegensatz hierzu ist der Wiregrid-Polarisator weitaus weniger anfällig gegenüber Winkelvariationen des einfallenden Lichtes. Jedoch ist die Transmission dieses Polarisators für gut kollimiertes Licht geringer als für die alternativen Polarisatoren.

In **Tabelle 6.3** und **Tabelle 6.4** werden die wichtigsten Eigenschaften der unterschiedlichen Polarisatoren zusammengefasst.

**Tabelle 6.3:** Überblick über die unterschiedlichen Polarisatoren für LCD-Projektoren (Trägerplatte).

Name	Technologie	Effizienz ( $\eta_p$ )	Einfalls- winkel
WP12L-VIS	Wiregrid	$\approx 83 \%$	$\pm 20^\circ$
LPNIRE2X2	Dielektrisch	$\approx 76\%$	$\pm 30^\circ$

Für ein LCoS-System bietet sich die Nutzung eines polarisierenden Strahlteilerwürfels an (PBS, Polarizing Beam Splitter)

**Tabelle 6.4:** Effizienzen (für parallel zur optischen Achse einfallendes Licht) und mögliche Einfallswinkel der unterschiedlichen Polarisatoren für LCoS-Projektoren (Strahlteilerwürfel).

Name	Technologie	Effizienz ( $\eta_P = T_P \cdot R_s$ ) (AR Coated)	Einfallswinkel
WPBS10-VIS	Wiregrid	$\approx 0,75 \cdot 0,7 = 0,525$	$\pm 25^\circ$
PBS101	Dielektrisch	$\approx 0,9 \cdot 0,995$	klein

Weiterhin geht aus den Datenblättern hervor, dass bei dem System LCoS + dielektrischer/Wiregrid Polarisator der Einfluss auf Effizienz und/oder Farbe sehr stark sein kann und somit zu untersuchen ist (siehe Kapitel 7). Eine abschließende Bewertung geschieht somit an den Prototypen.

### 6.1.3 EFFIZIENZ DES GESAMTSYSTEMS ANHAND AUSGEWÄHLTER KONZEPTE

In diesem Kapitel werden die Gesamteffizienz und der maximale Lichtstrom, welcher das System für gegebene Konfigurationen emittiert in Abhängigkeit des benötigten Bauraums für unterschiedliche Konzepte untersucht.

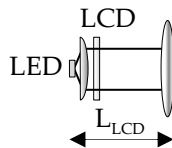
Ziel ist es zu bestimmen, welche Systemgrößen für unterschiedliche Konzepte notwendig sind, um bestimmte Lichtströme zu emittieren.



Es wird angenommen, dass sowohl Bildgeber wie auch LEDs in unterschiedlichen Dimensionen hergestellt werden können. Für diese Betrachtung wird für die Optik ein rotationssymmetrisches System angenommen. Die LED wie auch der Bildgeber sind in der Analyse quadratisch und weisen ein Aspektverhältnis von 1:1 vor (dies ist eine Standardkonfiguration für Projektionssystem, vgl. den MLA-Lichtteppich). Die Effizienzverluste, die sich aus den unterschiedlichen Formfaktoren ergeben (rundes Kollimatordesign strahlt auf rechteckige Displayapertur) werden durch Simulationen mitbetrachtet. Für die LED wird eine Leuchtdichte  $L_s$  von  $90 \text{ cd/mm}^2$  angenommen (Osram Oslon Compact, 8M [62]).

Die detaillierte Analyse eines LCD-Projektionssystems erfolgt im ersten Abschnitt. Die Bewertung der weiteren Systeme geschieht analog, wird jedoch für die bessere Lesbarkeit nur verkürzt dargestellt.

### *LED-LCD-System*



**Abbildung 6.5:** Schematische Darstellung eines transmissiven LCD-Systems.

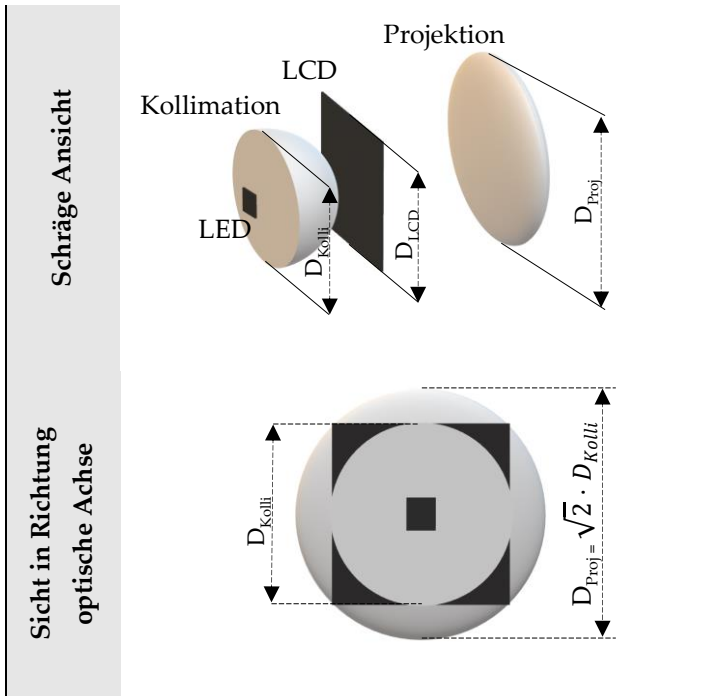
Die Gesamtlänge des LCD-Systems  $L_{LCD}$  (entlang der optischen Achse) setzt sich aus den Beiträgen unterschiedlicher Komponenten zusammen, welche im vorliegenden Beispiel teilweise mit dem Durchmesser des Kollimators ( $D_{Koll}$ ) skalieren:

$$\begin{aligned} L_{LCD} &= L_{LCD,x}(D_{Koll}) \\ L_{LCD,x}(D_{Koll}) &= L_{Koll}(D_{Koll}) + L_{LCD\_panel} + L_{Proj}(D_{Koll}) + S_{LED} \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$L_{LCD,y} = D_{Proj} \quad (6.7)$$

$$L_{LCD,z} = D_{Proj} \quad (6.8)$$

Der Durchmesser des Kollimators, die Kantenlänge des Bildgebers ( $D_{LCD}$ ) wie auch der Durchmesser der Projektionsoptik ( $D_{Proj}$ ) werden in ein festes Verhältnis zueinander gesetzt (siehe **Abbildung 6.6**). Die Projektionsoptik skaliert sinnvollerweise mit dem Durchmesser des Bildgebers. Dieser wiederum sollte nicht kleiner als die Kollimationsoptik sein.



**Abbildung 6.6:** Schematische Darstellung der Relationen im verwendeten Projektionssystem.

Mit der 2D-Étendue lässt sich die Divergenz nach dem Kollimator berechnen:

$$\alpha_{Koll}(D_{Koll}) = \sin^{-1} \left( \frac{L_{LED} \cdot \sin(\alpha_{LED})}{D_{Koll}} \right) \quad (6.9)$$

Dabei ist  $L_{LED}$  die Kantenlänge der LED (die aktive Fläche der LED lässt sich somit durch  $L_{LED}^2$  berechnen). Spezielle Freiformoptiken sind in der Lage, Effizienzen über 80% zu erreichen [63]. Hieraus

wird ein Sammelwinkel eines standardmäßigen Kollimators von etwa  $\alpha_{LED} = 65^\circ$  als realistisch abgeleitet. Licht der LED mit einem Einfallswinkel größer als  $65^\circ$  wird in diesem Fall nicht kollimiert und die Étendue der Lichtquelle auf Kosten der Effizienz reduziert. Der Winkel  $\alpha_{Koll}$  gibt die Divergenz des Lichtes nach der Kollimation an.

Der Zusammenhang zwischen der Länge der Kollimationsoptik  $L_{Koll}$  und deren Durchmesser ergibt sich bei étendueoptimierten Systemen zu:

$$L_{Koll}(D_{Koll}) = \frac{L_{LED}}{2 \cdot \tan\left(\sin^{-1}\left(\frac{L_{LED}}{D_{Koll}}\right)\right)} \quad (6.10)$$

Dabei befindet sich die Lichtquelle in der Brennweite des Kollimators. Die Länge des LCD-Panels wird durch:

$$L_{LCD\_panel} = 5 \text{ mm} \quad (6.11)$$

abgeschätzt (vgl. [64]). Der Polarisator wie auch der Analysator sind bei dieser Abschätzung in diesen Bauraum integriert. Wie aus **Abbildung 6.6** ersichtlich, ist der Durchmesser der Projektionsoptik durch:

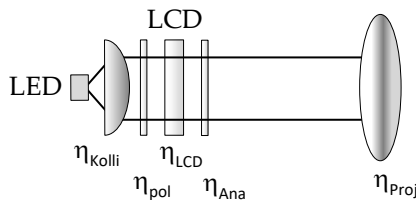
$$D_{Proj}(D_{Koll}) = \sqrt{2} \cdot D_{Koll} \quad (6.12)$$

gegeben. Der Abstand von Bildgeber zu Projektionsoptik ( $L_{Proj}$ ) wird folgend mit:

$$L_{Proj}(D_{Koll}) = F/\# \cdot D_{Proj} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot D_{Koll} \quad (6.13)$$

festgelegt. Für die Länge  $s_{LED} = LED + PCB$  werden 3 mm veranschlagt (Höhe der LED ca. 1 mm, Höhe des PCBs ca. 2 mm).

Die unterschiedlichen Bestandteile eines LCD-Projektionssystems, die Auswirkungen auf die Gesamteffizienz haben, sind in **Abbildung 6.7** dargestellt.



**Abbildung 6.7:** Überblick über die unterschiedlichen Beiträge zur Gesamteffizienz eines LCD-Systems.

$\eta_{Koll}$  setzt sich aus den Effizienzen bei den Übergängen zwischen zwei Medien ( $\eta_{Fresnel}$ ) und der Sammeleffizienz der Kollimationsoptik ( $\eta_{Kollekt}$ ) zusammen. Dabei steht  $\eta_{Fresnel}$  für die Verluste, die bei dem Übergang zwischen den Medien Luft-Glas bzw. Glas-Luft entstehen (der Brechungsindex des Glases beträgt im Beispiel 1,5).  $\eta_{Kollekt}$  gibt den Anteil des von der LED emittierten Lichtes an, welches kollimiert werden kann. Dieser entspricht wie, oben beschrieben, bei einem Winkel von  $65^\circ$  etwa 82%.

Da eine Polarisationskomponente des LED-Lichtes typischerweise nicht genutzt wird, ergibt sich  $\eta_{pol} = 0,5 \cdot \eta_P$  und  $\eta_{Ana} = \eta_P$ . Dabei steht

$\eta_P$  für die Effizienz der unterschiedlichen Polarisatoren bei polarisiertem Licht. In dem vorliegenden Fall wird aus **Tabelle 6.3** die höhere Effizienz (90%) gewählt.

Ein LC-Display besteht aus einer Glas-ITO Schicht, dem Flüssigkristall und einer weiteren Glas-ITO-Schicht. Der Einfluss dieser Schichten wird über die Transmission Glas-ITO  $\eta_{ITO}$  wiedergegeben. Nach zweimaligem Durchgang liegt die Transmission bei etwa 81% ([61]). Dabei werden die Übergänge zwischen Flüssigkristall und Glas aufgrund der ähnlichen Brechungsindizes dieser Materialien vernachlässigt (vgl. [65]). Darüber hinaus wird ein Teil des Lichtes durch Transistoren etc. im LCD-Display absorbiert/reflektiert. Diese Effizienz ( $\eta^*_{Aperture}$ , \*steht für die Abhängigkeit der Effizienz von der Systemgröße) ist von der Pixelgröße des LCDs abhängig (siehe **Abbildung B. 9**). Bei der Betrachtung der Gesamteffizienz ( $\eta_{LCD}$ ) wird auch dieser Faktor variiert. Dies geschieht aufgrund der Tatsache, dass bei Variation der Systemgröße ebenso das Display mitskaliert. Um eine Mindestanzahl an Pixeln zu ermöglichen, muss somit auch der Pixelpitch mitskaliert werden. Dies hat für kleine Systeme eine erhebliche Reduktion der Effizienz zur Folge.

Der Einfluss der unterschiedlichen Faktoren auf die „maximale Effizienz“  $\eta_{LCD,max}$  eines transmissiven LCDs ist in **Tabelle 6.5** zusammengefasst.

**Tabelle 6.5:** Überblick über die Effizienz eines LCD-Systems.

Bauteil	Faktoren	Wert
Kollimator	$\eta_{\text{Kollekt}}$	$\sin(65)^\circ = 0,821$
	$\eta^2_{\text{Fresnel}}$	$0,96^2$
Polarisator	$\eta_{\text{Pol}} \cdot \eta_p$	$0,5 \cdot 0,9$
LCD ( $\eta_{\text{LCD}}$ )	$\eta^2_{\text{ITO}}$	$0,9^2$
Analysator	$\eta_p$	$0,9$
Projektionsoptik	$\eta^2_{\text{Fresnel}}$	$0,96^2$
Maximale Effizienz	$\eta_{\text{LCD, max}}$	$\approx 0,23$

Die Gesamteffizienz des Systems setzt sich somit aus der maximalen Effizienz  $\eta_{\text{LCD,max}}$  und den bauraumabhängigen Faktoren  $\eta^*_{\text{aperture}}$ ,  $\eta^*_{\text{diff}}$ ,  $\eta^*_{\text{proj}}$  zusammen (die mit \* versehenen Effizienzen sind von der Länge  $L_{\text{LCD}}$  des Systems abhängig).

$$\eta_{\text{LCD}}(L_{\text{LCD}}) = \eta_{\text{LCD,max}} \cdot \eta^*_{\text{aperture}} \cdot \eta^*_{\text{diff}} \cdot \eta^*_{\text{proj}} \quad (6.14)$$

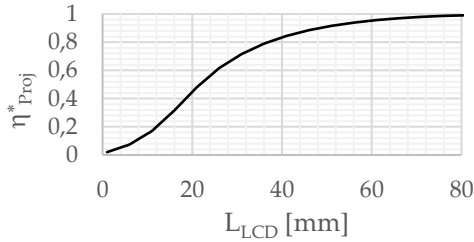
Um  $\eta^*_{\text{Aperture}}$  und  $\eta^*_{\text{diff}}$  zu bestimmen, wurde folgendes Vorgehen gewählt: Nach Kapitel 3.2 sind für eine Projektion mit einer Kantenlänge von einem Meter ca. 330 Pixel notwendig (330 x 330). Der Pixelpitch lässt sich somit in Abhängigkeit zur Displaygröße berechnen. Aus dem Graphen im Anhang „B.2.2 Bildgeber und Polarisatoren“ lässt sich der entsprechende Wert für  $\eta_{\text{Aperture}}$  ablesen. Der Wert für  $\eta_{\text{Diff}}$  ist für eine F-Zahl von zwei aus dem Dokument [66] für die unterschiedlichen Pixel pitches extrapoliert. Die Werte sind in **Tabelle B 1** im Anhang dargestellt.

Der Faktor  $\eta_{proj}^*$  gibt den Anteil des Lichtstromes an, der auf die Apertur der Projektionsoptik trifft:

$$\eta_{proj}^* = \frac{\Phi_{Output,Kollimator}}{\Phi_{Input,Projektionslinse}} \quad (6.15)$$

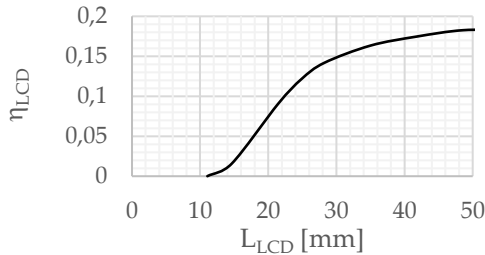
Dieser Faktor ist von der Größe der LED, sowie der Dimensionierung der Kollimation und der Projektionslinse abhängig. Die Geometrie der LED ist typischerweise rechteckig und Kollimationsoptiken weisen in den meisten Fällen runde Aperturen vor. Demnach ist die Divergenz nach dem Kollimator für unterschiedliche Raumrichtungen nicht identisch. Die Effizienz  $\eta_{proj}^*$  wurde über Simulationen für unterschiedliche Dimensionierungen des Gesamtsystems ermittelt. Die Größe der Lichtquelle beträgt dabei  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . Der Kollimator wurde mit einer kreisförmigen Apertur simuliert und die Beleuchtungsstärke direkt hinter der Kollimator-Ebene dabei als konstant angenommen. Die Winkelverteilung nach der Kollimation wurde durch ein quadratisches Tophatprofil beschrieben (was sich aus der quadratischen Apertur der LED ebenso in der Realität ergibt). Da für extrem kurze Projektionssysteme der Durchmesser der Kollimationsoptik sehr klein und die Divergenz nach dieser entsprechend groß ist, kann nur ein geringer Anteil des Lichtstromes durch die Projektionsapertur aufgesammelt werden. Größere Systeme (relativ zur LED) sind hingegen effizienter (siehe **Abbildung 6.8**), da der Lichtstrom besser kollimiert und durch die Projektionslinse abgebildet werden kann.





**Abbildung 6.8:** Effizienz  $\eta^*_{\text{Proj}}$ , die sich bei gegebenen Abhängigkeiten der Geometrien und einer  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  LED für unterschiedliche Systemlängen  $L_{\text{LCD}}$  ergibt (Fresnelverluste werden in diesem Fall ignoriert, jedoch für die Gesamteffizienz beachtet).

Somit lässt sich die Gesamteffizienz  $\eta_{\text{LCD}}$  (vergleiche Formel (6.14)) für das LCD-System in Abhängigkeit der Systemlänge  $L_{\text{LCD}}$  berechnen. Dies ist in **Abbildung 6.9** dargestellt.



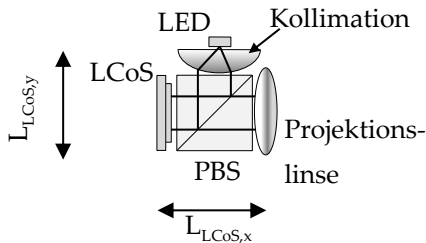
**Abbildung 6.9:** Effizienz des LCD- Gesamtsystems bei einer LED mit einer Größe von  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ .

Um mit dem vorliegenden LCD-System eine Effizienz von ca. 10% zu erzielen, sollte das System eine Mindestlänge von ca. 22 mm vorweisen. Bei der Verwendung einer LED mit einer Leuchtdichte von 90 cd/mm<sup>2</sup> führt dies zu einem Lichtstrom  $\phi_{out}$  von:

$$\begin{aligned}\phi_{out}(L_{LCD}) &= A_{LED} \cdot \pi \cdot L_S \cdot \eta_{LCD}(22 \text{ mm}) \\ \phi_{out}(23 \text{ mm}) &= 1 \text{ mm}^2 \cdot \pi \text{ sr} \cdot 90 \frac{\text{cd}}{\text{mm}^2} \cdot 0,1 = 28 \text{ lm}\end{aligned}\quad (6.16)$$

Für Projektionen zu Designzwecken kann bei einem LCD-System beispielsweise 28 lm ausreichend sein (vgl. Kapitel 3). Um bewerten zu können, ob ein solches System in den unterschiedlichen Bauräumen integriert werden kann, wird in Abschnitt 6.2 „Thermische Rahmenbedingungen“ die notwendige Dimensionierung des Kühlkörpers berechnet.

### LED-LCoS-System



**Abbildung 6.10:** Schematischer Aufbau eines Projektions-systems mit LCoS und PBS.

Analog zum Vorgehen wie bei dem LCD-System, wird das LCoS-System analysiert.

Die Gesamteffizienz setzt sich dabei aus ähnlichen Einzelbeiträgen zusammen. Unterschiede gibt es im polarisierenden Element und im Display, was auf die reflektive Natur des LCoS zurückzuführen ist. Das polarisierende Element ist in dem vorliegenden Fall ein PBS.

**Tabelle 6.6:** Überblick über die Beiträge zur Gesamteffizienz eines LCoS-Systems.

Bauteil	Faktoren	Wert
Kollimator	$\eta_{\text{Kollekt}}$	$\sin(65)^\circ = 0,821$
	$\eta^2_{\text{Fresnel}}$	0,96 <sup>2</sup>
PBS	$\eta_{\text{Pol}} \cdot \eta_p$	0,5 · 0,9 · 0,995
LCoS ( $\eta_{\text{LCoS,panel}}$ )	$\eta^2_{\text{ITO}}$	0,9 <sup>2</sup>
	$\eta_{\text{ref}}$	≈ 0,9
Projekti- onsoptik	$\eta^2_{\text{Fresnel}}$	0,96 <sup>2</sup>
Maximale Effizienz	$\eta_{\text{LCoS,max}}$	0,23

Die Gesamtrefektivität des LCoS-Chips setzt sich aus den Übergängen zwischen Luft und ITO ( $\eta_{\text{ITO}}$ ), der Aperture Ratio  $\eta_{\text{Apertur}}$  (siehe Anhang Überblick über Komponenten und Projektionstechnologien; *Liquid Crystal Displays (LCD und LCoS)*) sowie der Reflektivität  $\eta_{\text{ref}}$  der spiegelnden Fläche (Reflektivität von Aluminium [67]) zusammen.

Die freie Apertur des Systems ist im Vergleich zu LCD-Systemen typischerweise höher, da die Steuerelemente hinter den reflektiven Elementen angeordnet werden können (vergleiche **Abbildung B. 8**). Die Einzelbeiträge und Gesamteffizienz sind in der **Tabelle 6.6** aufgelistet. Die Gesamteffizienz ist abhängig von der Systemgröße und berechnet wie folgt:

$$\eta_{LCoS}(L_{LCoS}) = \eta_{LCoS,max} \cdot \eta_{proj}^* \cdot \eta_{aperture}^* \cdot \eta_{diff}^* \quad (6.17)$$

Hier wurde eine Diffraktionseffizienz  $\eta_{diff}^*$ , ähnlich zu der Effizienz des DMDs ([66]) angenommen,  $\eta_{aperture}^*$  kann aus **Abbildung B. 9** entnommen werden. Die notwendige Pixelgröße wird wie beim LCD abgeschätzt.

Die Systemlänge  $L_{LCoS,x}$  wird, da der Strahlengang durch eine Reflexion gefalten wird, über:

$$L_{LCoS,x} = L_{LCoS-panel} + L_{Proj} \quad (6.18)$$

berechnet (vergleiche **Abbildung 6.10**). Die Länge des LCoS-Panels  $L_{LCoS-panel}$  kann mit 5 mm angenommen werden [68]. Analog zur Berechnung der Systemgröße bei dem LCD-System wird angenommen, dass der Durchmesser der Projektionslinse um den Faktor  $\sqrt{2}$  größer als der des Kollimationssystems ist. Für die simulativ ermittelten Werte von  $\eta_{proj}^*$  wurde angenommen, dass sich das Display in der Entfernung des doppelten Durchmessers der Projektionsoptik befindet. Die Länge  $L_{LCoS,y}$  wird über:

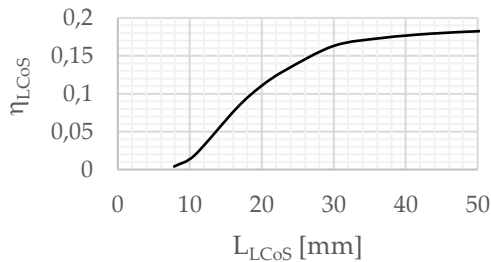
$$L_{LCOS,y} = L_{PBS} + L_{Koll} + L_{LED} \quad (6.19)$$

mit  $L_{Koll}$  aus (6.10) und  $L_{LED} = 3$  mm (Höhe LED + PCB, vergleiche standard PCBs/ LEDs) berechnet. Die Höhe des Systems ist über:

$$L_{LCOS,z} = L_{PBS} \quad (6.20)$$

gegeben. Analog zu den Überlegungen bei dem LCD-System wird die Gesamteffizienz  $\eta_{LCOS}$  in Abhängigkeit der Systemlänge  $L_{LCOS}$  dargestellt. Dabei wird  $L_{LCOS}$  als Maximum aus  $L_{LCOS,x}$  und  $L_{LCOS,y}$  gewählt.

$$L_{LCOS} = \max\{L_{LCOS,x}; L_{LCOS,y}; L_{LCOS,z}\} \quad (6.21)$$



**Abbildung 6.11:** Effizienz  $\eta_{LCOS}$  in Abhängigkeit der Systemlänge  $L_{LCOS}$  bei einer LED-Größe von  $1 \times 1$  mm<sup>2</sup>.

Eine Einordnung dieser Ergebnisse findet nach der Betrachtung des LED-DMD-Systems statt.

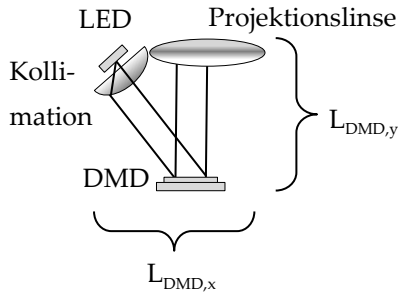
### *LED-DMD-System*

Die maximale Gesamteffizienz für ein DMD-System, setzt sich aus den Fresnelverlusten vor sowie nach der Reflexion, dem Reflexionsgrad der Spiegel ( $\eta_{\text{ref}}$ , die Reflexionseigenschaften werden mit Aluminium gleichgesetzt [69]), dem Füllfaktor ( $\eta_{\text{Apertur}}$ ) und der Diffraktionseffizienz ( $\eta_{\text{diff}}$ ) zusammen, wie in **Tabelle 6.7** gezeigt.

**Tabelle 6.7:** Überblick über die Effizienz eines DMD-Systems [70] ohne systemgrößenabhängige Variablen.

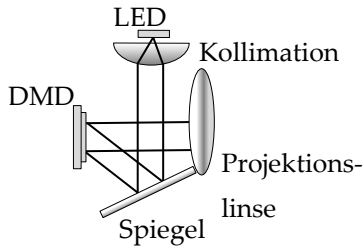
Bauteil	Faktoren	Wert
Kollimator	$\eta^2_{\text{Fresnel}}$	0,96 <sup>2</sup>
	$\eta_{\text{Kollekt}}$	0,82
DMD ( $\eta_{\text{DMD,panel}}$ )	$\eta^4_{\text{Fresnel}}$	0,96 <sup>4</sup>
	$\eta_{\text{Alu}}$	0,9
Projektionsoptik	$\eta^2_{\text{Fresnel}}$	0,96 <sup>2</sup>
„Maximale effizienz“	$\eta_{\text{DMD,max}}$	0,44

Für das DMD-System ergeben sich unterschiedliche Auslegungsmöglichkeiten im Grobkonzept. Bei dem einfachsten Konzept gelangt das Licht nach der Kollimation direkt auf den DMD-Chip und wird bei korrekter Einstellung der Spiegel im „ON-State“ durch die Projektionsoptik auf die Straße projiziert.



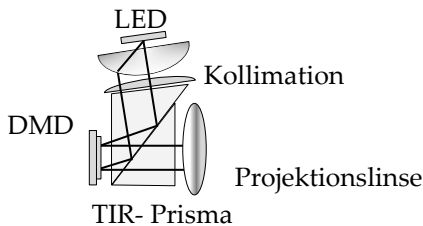
**Abbildung 6.12:** Schematischer Aufbau eines Projektions-systems mit DMD-Chip.

Eine weitere Auslegungsmöglichkeit ist in **Abbildung 6.13** zu sehen. Hier wird das Licht zunächst auf einen Spiegel gelenkt, welcher das Strahlenbündel auf den DMD umlenkt. Anschließend wird auch hier das Licht auf die Straße projiziert.



**Abbildung 6.13:** Schematischer Aufbau eines Projektions-systems mit DMD-Chip und Spiegel.

Ein komplexeres Design ist in **Abbildung 6.14** dargestellt. Durch ein TIR-Prisma wird das kollimierte Licht auf den DMD-Chip gelenkt. Dieser reflektiert das Licht unter einem anderen Winkel zurück. Das Licht kann anschließend aufgrund des neuen Winkels gegenüber der Grenzschicht des TIR-Prismas zur Projektionsoptik transmittiert werden.



**Abbildung 6.14:** Schematischer Aufbau eines Projektions-  
systems mit DMD-Chip und TIR-Prisma.

Für die Evaluation wird das Konzept in **Abbildung 6.12** genommen. Dieses hat den Vorteil, dass Effizienzverluste minimal sind. Die kompakte Bauweise, die sich durch das TIR-Prisma ergibt, wird für die erste Evaluation aufgrund der hohen Komplexität zunächst nicht bewertet.

Analog zu den bisherigen Bewertungen wird die Effizienz in Abhängigkeit von der Systemlänge  $L_{DMD}$  berechnet (siehe **Abbildung 6.12**). Durch Einsetzen von  $D_{Proj}$  in (6.22) - (6.24) ist direkt ersichtlich, dass  $L_{DMD}$  durch  $L_{DMD,x}$  gegeben ist.



$$L_{DMD,x} = D_{Proj} + (D_{Koll} \cdot \cos(24^\circ)) \quad (6.22)$$

$$L_{DMD,y} = L_{DMD-Panel} + L_{Proj} \quad (6.23)$$

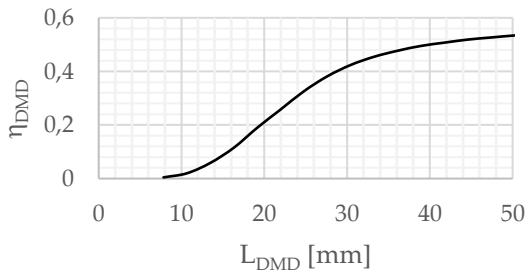
$$L_{DMD,z} = D_{Proj} \quad (6.24)$$

$$L_{DMD} = \max(L_{DMD,x}; L_{DMD,y}; L_{DMD,z}) \quad (6.25)$$

$\eta_{DMD}$  kann über:

$$\eta_{DMD}(L_{DMD}) = \eta_{DMD,max} \cdot \eta_{aperture}^* \cdot \eta_{diff}^* \cdot \eta_{Proj}^* \quad (6.26)$$

berechnet werden und ist in **Abbildung 6.15** dargestellt.



**Abbildung 6.15:** Effizienz eines DMD-Systems mit einer Projektionsoptik mit  $F/\#=2$  und einer LED mit einer Kantenlänge von einem Millimeter.

Für Automobilanwendungen sind zur Zeit (Stand 2021) unterschiedliche Chipsätze für Scheinwerfer- und Head-Up/Interieur- Display-Funktionen qualifiziert [71 bis 74]. Dabei unterscheiden sich die Systeme grundlegend in der Geometrie und der Anzahl der Pixel / Spiegel, wie in **Tabelle 6.8** dargestellt. Die fünf Systeme können jeweils

den beiden dargestellten Systemen (DLP55XX und DLP30XX) zugeordnet werden.

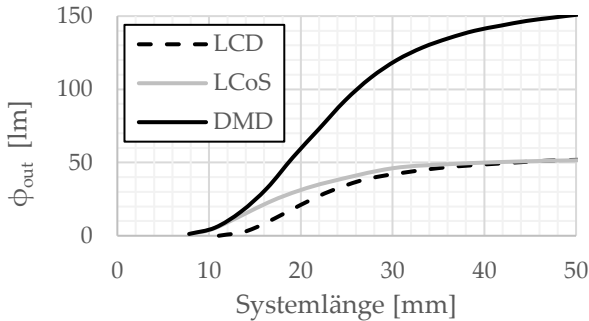
**Tabelle 6.8:** Wichtige Parameter der für den Automobilssektor qualifizierten Chips (\*: Input Resolution; gibt nicht die Anzahl der Spiegel wieder).

Bezeichnung	Auflösung	Durchmesser	Micromir- rorpitch	Kipp- winkel
DLP55XX	1152 × 576*	0,55"	7,6 μm	±12°
DLP30XX	864 × 480*	0,30"	7,6 μm	±12°

Dabei besitzt der kleinere Chip (DLP30XX) eine aktive Fläche von 3,699 × 6,5718 mm<sup>2</sup>. Die aktive Fläche des alternativen Moduls (DLP55XX) ist mit 12,447 × 6,226 mm<sup>2</sup> angegeben. Aus reinen Étenduebetrachtung ergibt sich, dass die Fläche der LED durch 1,05 mm<sup>2</sup> (für den DLP3030) respektive 3,35 mm<sup>2</sup> (für den DLP5531) gegeben ist. Bei der Annahme, dass die Leuchtdichte der LED durch 90 cd/mm<sup>2</sup> gegeben ist, ergibt sich mit der maximalen Effizienz von  $\eta_{\text{DMD,max}} = 0,44$  ein Lichtstromoutput von 159 lm Output für den DLP30XX und 507 lm für den DLP55XX bei étendueoptimierten Systemen.

### Vergleich der Systeme LCD, LCoS und DMD

Bei den oben beschriebenen Rahmenbedingungen ergibt sich für die drei Systeme der in **Abbildung 6.16** dargestellte Zusammenhang.

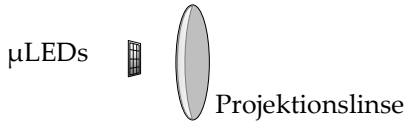


**Abbildung 6.16:** Vergleich des möglichen Lichtstromoutputs der drei untersuchten Systeme: LCD, LCoS und DMD. Die LED weist eine Leuchtdichte von  $90 \text{ cd/mm}^2$  und eine Seitenlänge von jeweils einem Millimeter.

Das DMD-System ist für jegliche Systemlängen in diesem Vergleich das effizienteste. Die Überlegenheit des LCoS-Systems für kleine Bau-räume lässt sich auf unterschiedliche Faktoren zurückführen. Bei kleinen Pixelgrößen des Displays ist das LCoS-Display effizienter als das LCD-Display. Darüber hinaus ergibt sich durch das Einbringen des PBS mit einer Brechzahl  $> 1$  für das LCoS-System eine höhere numerische Apertur. Ein wesentlicher Grund ist, dass der der Strahlen-gang gefaltet wird, wodurch sich die Länge des Systems weiter ver-kürzt.

Von den hier betrachteten Konzepten ist das LCD-Konzept den anderen Konzepten unterlegen. Um Lichtströme mit mehr als 50 lm zu realisieren, ist mit gegebener Lichtquelle ( $A_{LED} = 1 \text{ mm}^2$ ,  $L_{LED} = 90 \text{ cd/mm}^2$ ) nur das DMD-System in der Lage, diese Anforderung zu erfüllen.

### $\mu$ LEDs

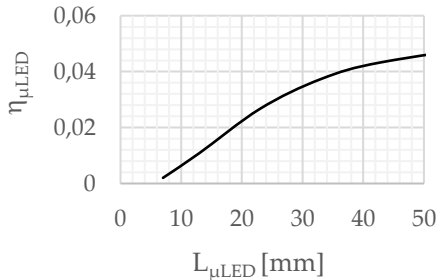


**Abbildung 6.17:** Schematische Darstellung eines Projektionssystems mit  $\mu$ LED- Technologie.

Die Größe eines  $\mu$ LED-Projektionssystems kann über die Auflösungsanforderungen und den Pixelpitch der einzelnen Leuchtmittel bestimmt werden. Für die Darstellung einer Projektion sind ca. 330 x 330 Pixel ein realistischer Wert. OSRAM stellt in der zweiten Eviyos-Generation einen Pixelpitch von  $40 \mu\text{m}$  vor [75]. Die Kantenlänge des Chips ( $L_{\mu\text{LED-Chip}}$ ) berechnet sich zu:

$$L_{\mu\text{LED-chip}} = 330 \cdot 40 \mu\text{m} = 13,2 \text{ mm} \quad (6.27)$$

Eine simulative Berechnung der Effizienz in Abhängigkeit des Bau-  
raumes (LED-Chip inklusive Projektionslinse) ergibt folgenden Zu-  
sammenhang:



**Abbildung 6.18:** Effizienz eines  $\mu\text{LED}$  Projektionssystems in Abhängigkeit zur Systemgröße, der Chip weist dabei eine Kantenlänge von 13,2 mm vor.

Bei der Simulation wurde eine quadratische Quelle mit lambert-förmiger Abstrahlcharakteristik genutzt. Die Projektionsapertur war dabei rund. Der Abstand von der Quelle zur Projektionslinse wurde mit dem doppelten Durchmesser der Projektionsoptik simuliert.

Zusätzlich muss jedoch noch beachtet werden, dass der Bildgeber (analog zu obigem Vorgehen) in etwa die Größe der Abbildungslinse vorweisen sollte:

$$D_{\text{Proj}} = \sqrt{2} \cdot 13,2 \text{ mm} = 18,67 \text{ mm} \quad (6.28)$$

Bei einer F-Zahl von zwei ergibt sich eine Systemlänge von etwa 4 cm (Brennweite des Projektionssystem + 3 mm (Höhe  $\mu\text{LED}$ + PCB)). Sehr viel kleinere Systeme führen zu Komplikationen bei der Abbildung (das Display wird größer als die Projektionslinse oder die Brennweite

des Projektionssystems ist sehr kurz, was eine aberrationsfreie Abbildung erschwert).

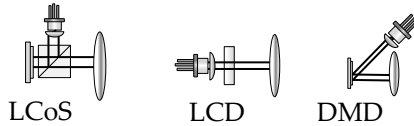
Die Lichtquelle weist in diesem Beispiel eine Fläche von ca. 174 mm<sup>2</sup> vor. Aus [76] lässt sich für  $\mu$ LEDs eine Leuchtdichte von 93 cd/mm<sup>2</sup> herleiten (4,6 lm pro Pixel mit einer Kantenlänge der  $\mu$ LEDs von 125  $\mu$ m; welche größer sind, als die hier verwendeten 40  $\mu$ m). Bei voller Bestromung der 108.900  $\mu$ LEDs müsste (bei einer Efficacy von 100 lm/W) eine Leistung von ca. 5 kW zur Verfügung gestellt werden. Hier führen thermische Einschränkungen dazu, dass ein solches Projektionssystem nicht den maximalen Lichtstrom abrufen kann (siehe Kapitel 6.2 „Thermische Rahmenbedingungen“).

Im Gegensatz zu den alternativen Systemen ist das  $\mu$ LED-System jedoch nicht subtraktiv. Bei einer Darstellung eines Bildes, bei welchem der Lichtstrom über verschiedene Graustufen um den Faktor  $X_{\mu LED}$ :

$$X_{\mu LED} = \frac{\eta_x}{\eta_{\mu LED}} \quad (6.29)$$

reduziert wird, weist das  $\mu$ LED System dieselbe Effizienz auf, wie das System X (DMD, LCD, LCoS). Bei geringerer Ausleuchtung (entspricht einer höheren Subtraktion des Lichtes durch die Flächenlichtmodulatoren) ist das  $\mu$ LED-System effizienter. Diese größere Effizienz bedeutet jedoch nicht, dass die Beleuchtungsstärke auf der Straße erhöht wird, da sich die Leuchtdichte der  $\mu$ LEDs dadurch nicht erhöht. Es handelt sich hierbei um eine Reduktion der aufgenommenen Leistung.

*Laser in Kombination mit SLM oder Mikrospiegel*



**Abbildung 6.19:** Schematische Darstellung unterschiedlicher Projektionssysteme.

Aufgrund der minimalen Étendue der Laserlichtquelle sind bereits kleine Systeme, wie folgend gezeigt wird, étendueoptimiert. In [77] wird beispielhaft für einen Laser eine Divergenz  $\theta_{\perp} \approx 40^{\circ}$ ,  $\theta_{\parallel} \approx 0,4^{\circ}$  bei einem Kantenemitter der Wellenlänge 650 nm angegeben. Die Austrittsöffnungen werden mit  $d_{\perp} \approx 1\mu\text{m}$  und  $d_{\parallel} \approx 100\mu\text{m}$  angegeben.

Bei einem Bildgeber mit einer Seitenlänge von 5 mm kann ein Kollimator mit einem Durchmesser von 5 mm verwendet werden. Dies führt zu:

$$\alpha_{Koll,i,\parallel} = \sin^{-1} \left( \frac{d_{\parallel}}{D_{Koll,i}} \cdot \sin(\theta_{\parallel}) \right) = \quad (6.30)$$

$$\sin^{-1} \left( \frac{100\mu\text{m}}{5\text{ mm}} \cdot \sin(0,4^{\circ}) \right) = 0,008^{\circ}$$

$$\alpha_{Koll,i,\perp} = \sin^{-1} \left( \frac{d_{\perp}}{D_{Koll,i}} \cdot \sin(\theta_{\perp}) \right) = \quad (6.31)$$

$$\sin^{-1}\left(\frac{1\mu m}{5\text{ mm}} \cdot \sin(40^\circ)\right) = 0,007^\circ$$

Durch die geringe Divergenz wird somit der komplette Lichtstrom von der Projektionsoptik schon bei (den hier relevanten) kleinsten Bauräumen erfasst. Aus diesem Grund kann die Effizienz näherungsweise mit einem festen Wert angegeben werden. Relevant sind in diesem Fall die Fresnel-Verluste sowie die Verluste durch den Bildgeber. Weiterhin muss für die Mischung von Weißlicht der Einfluss des Beamcombiners betrachtet werden. Die Effizienz des  $\eta_{\text{Combiner}}$  kann durch eine Vielzahl an Beschichtungen größer als 90% sein. Dabei ist  $\eta_{\text{Combiner}}$  abhängig von der Laserdiode und den R:G:B-Anteilen des emittierten Lichts. Bei einer Zusammensetzung von R:G:B = 0,5:0,32:0,18 ergibt sich bei drei Beamcombinern aus dem Sortiment von Optics Balzers [78] eine Effizienz von  $\eta_{\text{Combiner}} \approx 85\%$ .

$$\begin{aligned} \eta_{DMD,Laser} &= \eta_{\text{Kolli}} \cdot \eta_{\text{Combiner}} \cdot \eta_{DMD,panel} \cdot \eta_{\text{aperture},DMD} \\ &\quad \cdot \eta_{\text{diff},DMD} \cdot \eta_{\text{proj}} \\ &\approx 0,96^2 \cdot 0,85 \cdot 0,76 \cdot 0,94 \cdot 0,83 \\ &\quad \cdot 0,96^2 \approx 0,43 \end{aligned} \tag{6.32}$$

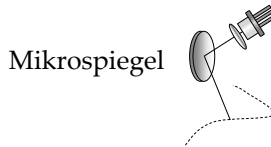
$$\begin{aligned} \eta_{LCoS,Laser} &= \eta_{\text{Kolli}} \cdot \eta_{\text{Combiner}} \cdot \eta_{LCoS,panel} \cdot \eta_{\text{aperture},LCoS} \\ &\quad \cdot \eta_{\text{diff},LCoS} \cdot \eta_{\text{PBS}} \cdot \eta_{\text{proj}} \\ &\approx 0,96^2 \cdot 0,85 \cdot 0,729 \cdot 0,92 \cdot 0,84 \cdot 0,9 \\ &\quad \cdot 0,92 \approx 0,37 \end{aligned} \tag{6.33}$$



$$\begin{aligned}
 \eta_{LCD,Laser} &= \eta_{Kollli} \cdot \eta_{Combiner} \cdot \eta_p^2 \cdot \eta_{LCD,panel} \\
 &\quad \cdot \eta_{aperture,LCD} \cdot \eta_{diff,LCD} \cdot \eta_{proj} \\
 &\approx 0,96^2 \cdot 0,85 \cdot 0,9^2 \cdot 0,9^2 \cdot 0,56 \cdot 0,93 \\
 &\approx 0,26
 \end{aligned} \tag{6.34}$$

Dabei wurde bei der Effizienz  $\eta_{LCOS,Laser}$  bzw.  $\eta_{LCD,Laser}$  auf den effizienteren Polarisator zurückgegriffen und typische Werte für  $\eta_{aperture,x}$  und  $\eta_{diff,x}$  verwendet ([66, 79, 80]).

### *Mikrospiegel und RGB-Laser*



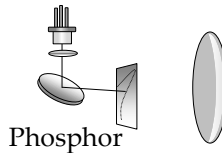
**Abbildung 6.20:** Vereinfachte, schematische Darstellung eines Laserscanners mit Mikrospiegel.

Die Reflexion des Mikrospiegels wird mit der Reflexion von Aluminium gleichgesetzt und beträgt somit etwa 90%. Bei der Hinzunahme von Kollimationslinsen mit jeweils zwei Übergängen zwischen zwei Medien wird zusätzlich noch der Faktor  $\eta_{Kollli} = 0,96^2$  berücksichtigt. Somit ergibt sich für eine Weißlichtmischung die Gesamteffizienz zu:

$$\begin{aligned}
 \eta_{RGBScanner} &= \eta_{Kollli} \cdot \eta_{Combiner} \cdot \eta_{Mikrospiegel} \\
 &\approx 0,96^2 \cdot 0,85 \cdot 0,9 \approx 71\%
 \end{aligned} \tag{6.35}$$

Durch die minimale Anzahl an Komponenten im Laserscannersystem ergeben sich nur vergleichsweise geringfügige Verluste. Durch die Kollimation ergeben sich zwei Fresnelübergänge. Bei der Nutzung von beschichteten Oberflächen kann die Effizienz weiter gesteigert werden. Insbesondere bei monochromatischem Licht auf über 90%.

### *Mikrospiegel und phosphorkonvertiertes Laserlicht*



**Abbildung 6.21:** Schematische Darstellung eines Systems mit phosphorkonvertiertem Laserlicht.

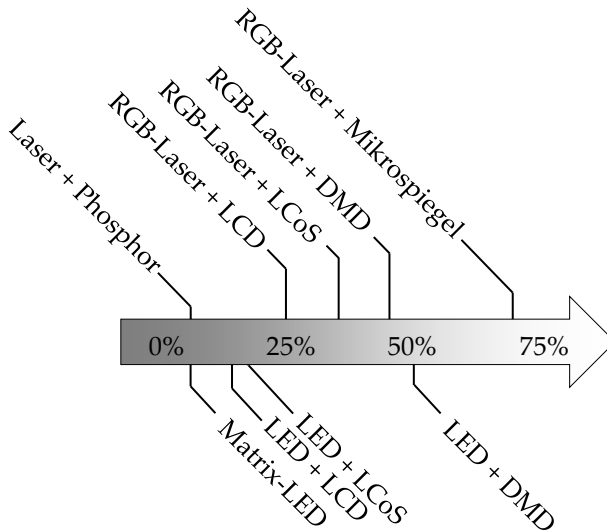
Bei der Effizienzbetrachtung muss die Kollimation, der Mikrospiegel und der Einfluss der Projektionslinse/dessen Sammeleffizienz betrachtet werden. Für eine lambertsche Abstrahlcharakteristik des Phosphors ergibt sich bei  $F/\# = 2$ :

$$\begin{aligned}\eta_{\text{PhosphorScanner}} &= \eta_{\text{Kolle}} \cdot \eta_{\text{Mikrospiegel}} \cdot \eta_{\text{Proj}} \\ &\approx 0,96^2 \cdot 0,9 \cdot \sin^2(14^\circ) \approx 4,9\%\end{aligned}\tag{6.36}$$

Durch die geringe Effizienz dieser Systemauslegung ist ein großer Pixel auf dem Phosphor notwendig, der hinreichend Lichtstrom vorhält. Im Schnitt muss aus jeder Position des Laserspots auf dem Phosphor der notwendige Lichtstrom emittiert werden. Für einen Lichtstromoutput von 15 lm muss bei einer Effizienz von ca. 5% eine Spotgröße von 275  $\mu\text{m}$  auf dem Konverter erzeugt werden (siehe [4]). Zur Bereitstellung einer Vielzahl von Pixeln, wird ein entsprechend großer Konverter und Projektionssystem benötigt (vergleiche **Abbildung 6.28**).

### 6.1.4 ZUSAMMENFASSUNG EFFIZIENZBETRACHTUNG

**Abbildung 6.22:** Maximale Effizienzen der unterschiedli-



chen Systeme bei einer Projektion eines weißen Feldes. Die Randbedingungen sind dem Text zu entnehmen.

Die höchste Systemeffizienz ergibt sich für ein Lasersystem, welches mit einem Mikrospiegel kombiniert wird. Eine Effizienz von mehr als 70% sind mit einem solchen System durchaus möglich. Sowohl für den Laser, als auch für die LED ist durch die DMD-Technologie eine Effizienz im Bereich von ca. 50% möglich. Jedoch gilt insbesondere für die LED-Systeme, dass die Effizienz für kleine Bauräume stark

sinkt. Auf dieser Seite ergeben sich die Vorteile für Systeme, welche einen Laser nutzen. In **Abbildung 6.22** sind die maximalen Effizienzen verschiedener Systeme dargestellt. Dabei wurden die jeweils für das System effizientesten Polarisatoren gewählt. Für das LCD-System wurde ein Pixelpitch von  $15\ \mu\text{m}$  gewählt ( $6,4\ \mu\text{m}$  für LCoS und  $7,6\ \mu\text{m}$  für DMD). Sowohl das  $\mu\text{LED}$ -System wie auch der phosphorkonvertierte Laser sind aufgrund des lambertschen Abstrahlverhaltens stark in Ihrer Effizienz eingeschränkt. Hier gilt es jedoch zu beachten, dass die Systeme additiv sind.

Für eine finale Bewertung der Konzepte sind die thermischen Anforderungen von hoher Relevanz. Diese werden im folgenden Kapitel näher untersucht.

## 6.2 THERMISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Integrationsmöglichkeiten eines Projektionssystems hängen maßgeblich von der Dimensionierung des gewählten Kühlkonzeptes ab. Hier kann zwischen drei Auslegungsarten unterschieden werden:

- *Hohe Wärmekapazität mit geringer Kühlleistung*
- *Kühlung durch freie Konvektion*
- *Aktive Kühlung*

Im Fall geringer Konvektion (*hohe Wärmekapazität ohne Konvektionskühlung*) wird angenommen, dass der Wärmeeintrag auf den Kühlkörper sehr viel größer ist als dieser durch Konvektion gekühlt werden kann. Somit wird in der hier vorliegenden Betrachtung die Kühlung durch Konvektion komplett vernachlässigt. Der Kühlkörper wird so dimensioniert, dass eine definierte Wärmemenge von diesem aufgenommen werden kann. Ein Betrieb über eine gegebene Zeit kann somit gewährleistet werden. Nach dieser Zeit kann sich die Temperatur des Systems durch eine Abschaltung oder Dimmung dem Grundzustand (durch eine geringe Konvektion) wieder annähern.

Bei der Auslegung des Kühlkonzeptes mit *hoher Konvektionskühlung*, muss der Wärmetransport durch ein strömendes Gas gewährleistet sein. Ein Dauerbetrieb des Systems kann somit gegebenenfalls er-

möglichst werden. Bauraumrestriktionen können jedoch die Konvektionsströme reduzieren. Daher ist für eine Auslegung des Kühlkonzeptes mit hoher Konvektion die Kenntnis der Bauraumgeometrie erforderlich.

Die Varianten der *aktiven Kühlkonzepte* sind vielfältig. Lüfter, Wasserkühlung oder Peltierelemente sind hierfür Beispiele. Da die Systemkomplexität und/oder der Bauraum stark wachsen können/kann, wird diese Art der Kühlung in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Bei genauer Kenntnis des Systems, des Bauraums und der Infrastruktur kann eine aktive Kühlung jedoch sinnvoll sein.

Zunächst wird der Fall ohne Konvektion untersucht (*hohe Wärmekapazität ohne Konvektionskühlung*). Dabei wird die für eine bestimmte Betriebsdauer notwendige Wärmekapazität und hieraus das Volumen des Kühlkörpers ermittelt. Dabei handelt es sich um eine grobe Dimensionierungsbetrachtung. Es erfolgt keine genaue Auslegung.

Im zweiten Teil wird dieser Ansatz mit einer Kühlung mit hoher Konvektionskühlung verglichen.

#### *Konzepte mit hoher Wärmekapazität bei geringer Konvektion*

Nach **Tabelle 3.6** wird für die unterschiedlichen Anforderungsszenarien ein Lichtstrom von 15 lm, 98 lm, 340 lm oder 17.000 lm benötigt. Die notwendige Leistung wird über den benötigten Lichtstrom ermittelt. Mit der Efficacy ( $\eta_{\text{eff}}$ ) des Leuchtmittels (hier: 100 lm/W, [62]), der

Degradation der LED im Betrieb ( $\eta_{deg} = 90\%$  [62]) und der Effizienz des Projektionssystems  $\eta_{sys}$  ergibt sich:

$$P(\eta_{sys}) = \frac{\Phi_{out}}{\eta_{eff} \cdot \eta_{deg} \cdot \eta_{sys}} \quad (6.37)$$

Da weitere Elektronik ausgelagert werden kann, werden Einflüsse dieser hier nicht weiter betrachtet. Für die Dimensionierung des Kühlkörpers müssen die maximalen Temperaturen für die jeweiligen Systeme (**Tabelle 6.9**) und die Dauer des Betriebs beachtet werden. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist ein Kurzzeitbetrieb ( $t \approx 300$  s) des Systems für einige Szenarien möglich. Die Außentemperatur ( $T_{amb}$ ) wird auf einen Wert von  $40^\circ\text{C}$  gesetzt, da dies eine Worst-Case-Abschätzung darstellt.

**Tabelle 6.9:** Maximaltemperatur der unterschiedlichen Komponenten eines Systems.

Komponente	$T_{max}$
DMD, LCD, LCoS	$100^\circ\text{C}$
LED	$120^\circ\text{C}$
$\mu\text{LED}$	$120^\circ\text{C}$
RGB- Laser	$40^\circ\text{C}-60^\circ\text{C}$
Micromirror	$> 100^\circ\text{C}$

Die thermische Kapazität ( $C_{Alu} = c_{Alu} \cdot m_{alu}$ ) des Kühlkörpers (hier: Aluminium, da dies eine hohe Wärmekapazität vorweist) muss in der Lage sein, bei der gegebenen Umgebungstemperatur die durch den



Betrieb entstehende Wärmemenge zu absorbieren. Die Masse des Kühlkörpers kann über:

$$m_{Alu} = \frac{P \cdot t}{c_{Alu} \cdot (T_s - T_{amb})} \quad (6.38)$$

berechnet werden. Eine Anbindung an das Fahrzeug (und somit eine Nutzung als Wärmesenke) erweist sich in vielen Fällen als nicht Praktikabel (Umgebung aus Plastik, komplexe Integration des Bauteils, dreidimensionale Einstellung des Projektors erschwert).

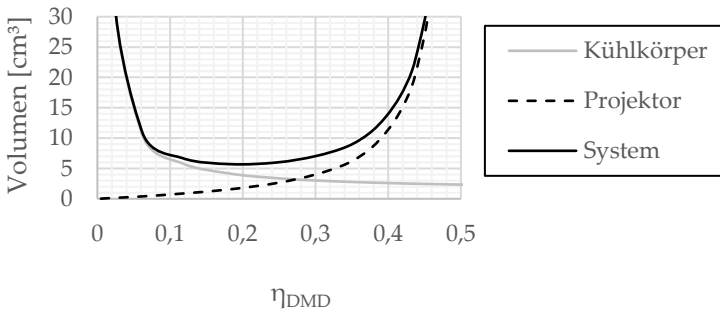
Vereinfachend wird angenommen, dass die Temperatur des Kühlkörpers durch eine gute thermische Anbindung der limitierenden Maximaltemperatur des Systems gleichgesetzt werden kann. Für ein LED-DMD Projektionssystem ergibt sich bei einer Systemeffizienz von 15% und einem emittierten Lichtstrom von 15 lm mit (6.37) und (6.38) eine notwendige Kühlmasse von:

$$\begin{aligned} m_{Alu} &= \frac{\frac{\Phi_{out}}{\eta_{eff} \cdot \eta_{deg} \cdot \eta_{sys}} \cdot t}{c_{Alu} \cdot (T_s - T_{amb})} = \\ &= \frac{15 \text{ lm}}{100 \text{ lm/W} \cdot 0,9 \cdot 0,15} \cdot 300 \text{ s} \\ &= \frac{300 \text{ lm}}{13,5 \text{ lm/W}} = 22,2 \text{ W} \\ &= \frac{22,2 \text{ W}}{0,897 \text{ J/(kg K)} \cdot (100^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})} = 6,19 \text{ g} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Über die Dichte des Materials lässt sich das notwendige Volumen bestimmen.

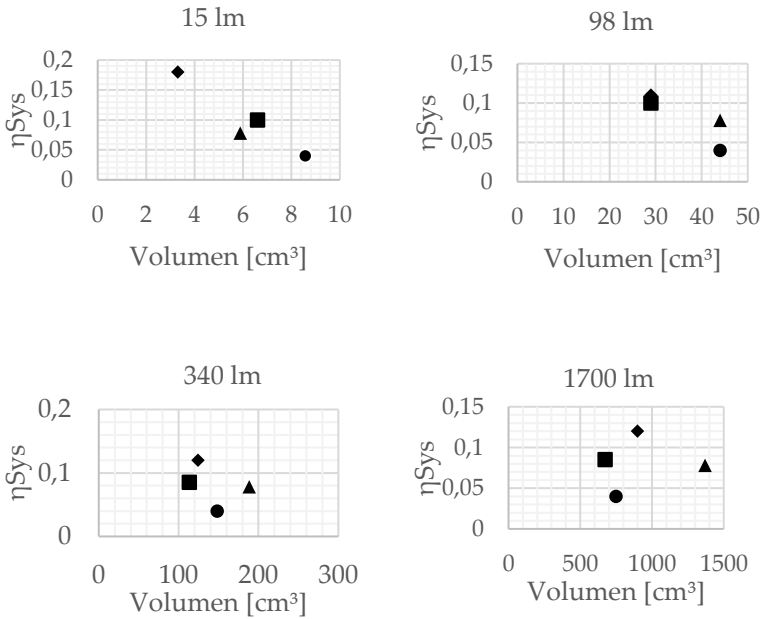
$$V_{Alu} = \frac{m_{Alu}}{\rho_{Alu}} = \frac{6,19 \text{ g}}{2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \approx 2,3 \text{ cm}^3 \quad (6.40)$$

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, ergeben sich für unterschiedliche Größen des Projektionssystems verschiedene Effizienzen. Ziel sollte es sein, das Gesamtvolumen (Volumen des Projektionssystems + Volumen des Kühlkörpers) zu minimieren. Dabei kann unter Umständen ein großes, aber effizientes Projektionssystem zielführender sein als ein kleines und ineffizientes System (kleiner Projektionssystem/ großer Kühlkörper).



**Abbildung 6.23:** Schematische Darstellung des Volumens der unterschiedlichen Komponenten in Abhängigkeit von der Effizienz.

Der auf diesem Weg ermittelte „optimierte Bauraum“ für die unterschiedlichen Systeme ist in **Abbildung 6.24** dargestellt.



**Abbildung 6.24:** Optimiertes Volumen und Effizienz der verschiedenen Systeme bei unterschiedlichem Lichtstromoutput. Dabei steht das Symbol „♦“ für DMD, „■“ für LCD, „▲“ für ein LCoS-System und „●“ für ein  $\mu\text{LED}$ -System.

Die Systemgrößen befinden sich bei einem Output von ca. 15 lm in einem Bereich zwischen  $2,5 \text{ cm}^3$  und  $8,5 \text{ cm}^3$ , bei 98 lm zwischen  $25 \text{ cm}^3$  und  $50 \text{ cm}^3$ . Wenn 340 lm zur Verfügung gestellt werden müssen, befindet sich das Systemvolumen zwischen  $100 \text{ cm}^3$  und  $200 \text{ cm}^3$ . Bei

1700 lm liegt die Systemgröße zwischen 500 cm<sup>3</sup> und 1500 cm<sup>3</sup>. Hinzugerechnet werden müssen noch Gehäuse und Steckerverbindungen.

### *Konzepte mit hoher Konvektionskühlung*

Im Fall freier Konvektion kann die Temperatur des Kühlkörpers ( $T_{\text{sink}}$ ) über:

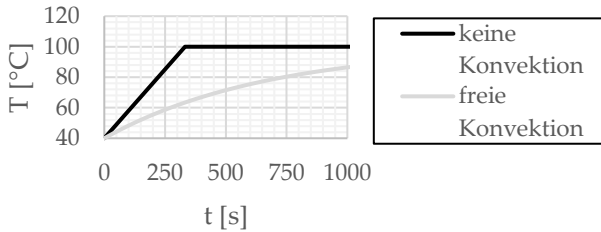
$$T_{\text{sink}} = P \cdot R_{th,sa} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{c_{Alu} \cdot R_{th,sa}}} \right) + T_{amb} \quad (6.41)$$

berechnet werden [81]. Der thermische Widerstand kann über:

$$R_{th,sa} = \frac{\Delta\theta_{sa}}{P} = \frac{T_{\text{sink}} - T_{amb}}{P} \quad (6.42)$$

berechnet werden. Beispielfhaft soll das DMD-LED-System für eine Sicherheitsprojektion ( $\phi_{\text{out}} = 98 \text{ lm}$ ) im Fall *freier Konvektion* mit der Auslegung für den Fall *geringer Konvektion* verglichen werden. Das Projektionssystem weist eine Effizienz von 12% auf (vgl. **Abbildung 6.12**). Die vorzuhaltende Leistung  $P$  entspricht somit 9,07 W. Der maximale thermische Widerstand des Kühlkörpers darf somit nach (6.42) 6,62 K/W betragen. Der Kühlkörper PR146 von Alutronic [82] kann für diese Anwendung mit einem Volumen von 42 cm<sup>3</sup> gewählt werden. Die Temperaturentwicklung für dieses Konzept ist in **Abbildung 6.25** zu sehen. Zum Vergleich ist der Temperaturverlauf für den

Fall *keine Konvektion* ebenso dargestellt. Dabei wurde die gleiche Masse wie sie der Kühlkörper PR146 vorweist ( $m = 56 \text{ g}$ ) gewählt.



**Abbildung 6.25:** Vergleich des Temperaturverlaufs für einen Kühlkörper mit freier Konvektion ( $V_{\text{sink}} = 42 \text{ cm}^3$ ) zu unterschiedlichen Konzepten ohne Konvektion; die Erläuterungen sind im Text zu finden.

Bei *freier Konvektion* ist ein Dauerbetrieb möglich, die Temperatur des Kühlkörpers nähert sich asymptotisch der Maximaltemperatur. Nach 333 Sekunden erreicht das System die maximale Temperatur. Die beiden Graphen zeigen die extremen Verläufe für *keine Konvektion* und *freie Konvektion*. Das reale System befindet sich je nach Auslegung zwischen der grauen und schwarzen Linie.

*Abschätzung für die Sichtbarkeit der Projektion bei Tag*

Um 17000 Lumen zu emittieren, ist ein sehr großer Bauraum (zwischen  $500 \text{ cm}^3$  und  $1500 \text{ cm}^3$ , *keine Konvektion*) und eine Leistung von

ca. 200 W notwendig. Dabei kann nur ein kleines Feld (1 m<sup>2</sup>) hinreichend beleuchtet werden. Wenn weitere/größere Felder diese Beleuchtungsstärke vorweisen sollen, müssen weitere Systeme mit gleicher Größe und Leistungsaufnahme integriert werden. Durch diese Einschränkungen kann eine sinnvolle Nutzung von Projektionen mit LEDs, die am Tag sichtbar sind, als (aktuell) kaum umsetzbar bewertet werden.

#### *Thermische Rahmenbedingungen für Lasersysteme*

Für R-, G-, B- Lasersysteme ist es aufgrund der extremen Beschränkungen der Arbeitstemperaturen der Laserdioden (insbesondere LDs, die im roten Wellenlängenbereich Licht emittieren) schwierig, ein passives Kühlsystem zu entwickeln. Wie im Anhang „Überblick über Komponenten und Projektionstechnologien“ beschrieben, liegen die maximalen Temperaturen für rote Laserdioden im CW-Betrieb teilweise bei +40°C [83]. Somit ist eine geeignete Kühlung bei einer Umgebungstemperatur von 40°C ausgeschlossen. Für einen Großteil der Anwendungsfälle ist eine aktive Kühlung notwendig. Diese ist kostenintensiver, komplexer und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Bei phosphorkonvertierenden Systemen ist ein vergleichsweise großer Bildgeber/Phosphorkonverter notwendig, um die nötige Anzahl an disjunkten Pixeln mit entsprechender Leuchtdichte zu erzeugen (vgl.

Kapitel 6.3). Aufgrund dieser Begrenzungen bei der Auslegung des Projektionssystems wird folgend ausschließlich der Kühlkörper betrachtet. Für die in **Tabelle 6.10** dargestellten Werte wurde eine Systemeffizienz von 36 lm/W [84] angenommen.

**Tabelle 6.10:** Volumen ( $V_{\text{sink}}$ ) der notwendigen Kühlkörper bei unterschiedlichen Lichtstromanforderungen ( $\phi_{\text{out}}$ )

$\phi_{\text{out}}$	$V_{\text{sink}}$
15 lm	14 cm <sup>3</sup>
98 lm	94 cm <sup>3</sup>
340 lm	325 cm <sup>3</sup>
17000 lm	16248 cm <sup>3</sup>

Die Berechnung ist analog zu (6.39) - (6.40). Die Sammeleffizienz der Projektionsoptik wurde gleich 5% gesetzt. Es ist ersichtlich, dass das Volumen des Kühlkörpers (ohne Projektionssystem) größer ist als die alternativen Konzepte.

*Zusammenfassung thermische Betrachtungen*

Mit **Tabelle 3.8** kann eine Einordnung der unterschiedlichen Systeme in die entsprechenden Bauräume vorgenommen werden. Aus der vorhergehenden Analyse ergibt sich, dass beispielhaft das DMD-System eine Designprojektion (ca. 15 lm) aus dem Schweller (und somit auch aus anderen Bauräumen) ermöglicht (vergleiche Abbildung 6.24 mit Tabelle 3.9). Bei höheren Lichtströmen (98 lm – 1700 lm) sind

sukzessiv größere Bauräume notwendig. Eine bei Tag sichtbare Projektion ist mit einem subtraktiven LED-System aufgrund diverser Faktoren kaum realisierbar. Eine Integration benötigt extrem viel Bauraum, die Projektionsfläche darf dabei nicht sehr groß werden und der Energieverbrauch ist sehr hoch (in den meisten Fällen  $\geq \approx 200$  W).

RGB-Lasersysteme sind den LED-Systemen aus thermischer Sicht unterlegen. Aufgrund der stark limitierten Arbeitstemperaturen (insbesondere bei roten Laserdioden) sind aktive Kühlkonzepte notwendig. Diese werden aufgrund der höheren Komplexität als nachteilhaft eingestuft.

Das Phosphorsystem benötigt bei gegebener Sammeleffizienz größere Kühlkonzepte als die alternativen LED-Systeme. Durch eine Erhöhung der Effizienz durch ein anderes optisches System sind ebenso kleinere Kühlkörper möglich.



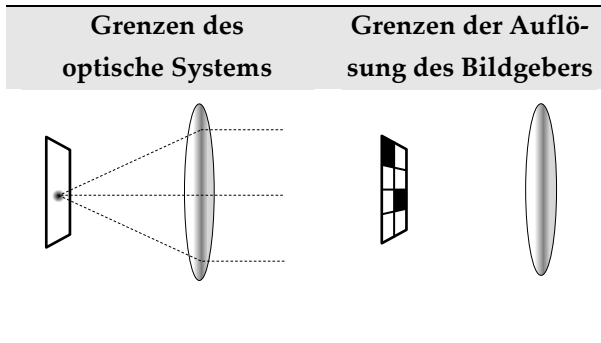
### 6.3 AUFLÖSUNGSVERMÖGEN VERSCHIEDENER PROJEKTIONSSYSTEME

Bei abbildenden Systemen hängt die Bildqualität des projizierten Inhalts von zwei Faktoren ab:

- *Die Grenzen des optischen Systems*
- *Die Grenzen der Auflösung durch den Bildgeber*

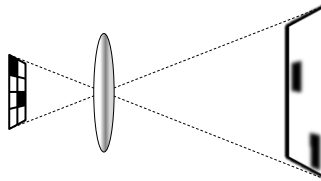
Die Grenzen des optischen Systems setzen sich durch Aberrationen und durch eine begrenzte Auflösung durch Beugungseffekte zusammen (siehe **Tabelle 6.11**, links). Diese Einschränkung wird in Abschnitt 6.3.1 kurz erläutert.

**Tabelle 6.11:** Links: schematische Darstellung der minimal auflösbaren Spotgröße einer Projektionsoptik. Rechts: Limitierung der Auflösung durch den Bildgeber, mit einem Pixel als kleinste Struktur.



Durch die minimale Pixelgröße des Bildgebers werden der Abbildungsqualität ebenfalls Grenzen gesetzt (**Tabelle 6.11**, rechts). Diese Limitierungen werden in Abschnitt 6.3.2 untersucht (*Grenzen der Auflösung durch den Bildgeber*).

Beide Effekte zusammen ergeben eine Unschärfe in der Projektion, wie sie in **Abbildung 6.26** dargestellt ist.



**Abbildung 6.26:** Auswirkung auf die Abbildung durch die minimale Pixelgröße und Abbildungsfehler durch die Optik.

RGB-Laserscanner werden ebenfalls im Abschnitt *Grenzen der Auflösung durch den Bildgeber* dieses Kapitels behandelt und mit dem Auflösungsvermögen abbildender Systeme verglichen.

### 6.3.1 GRENZEN DES OPTISCHEN SYSTEMS

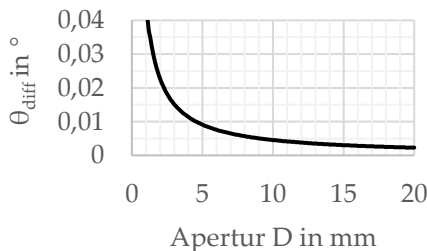
Der Fehler, welcher bei einer Abbildung durch ein optisches System entsteht, setzt sich aus den Beugungseffekten an der Apertur der Projektionsoptik  $\theta_{\text{diff}}$ , und den Aberrationen des Linsensystems  $\theta_{\text{ab}}$  zusammen. Der Gesamtfehler  $\theta_E$  ist durch:

$$\theta_E = \theta_{\text{diff}} + \theta_{\text{ab}} \quad (6.43)$$

gegeben. Der durch die Beugung entstehende Fehler im Winkel lässt sich durch:

$$\theta_{\text{diff}} = \sin \left( 1,22 \frac{\lambda}{D} \right)^{-1} \quad (6.44)$$

ermitteln. Mit der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Durchmesser der Apertur  $D$ . Der somit minimale auflösbare Winkel für Licht im roten Spektralbereich ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ) ist in **Abbildung 6.27** in Abhängigkeit von der Apertur  $D$  dargestellt.



**Abbildung 6.27:**  $\theta_{\text{diff}}$  für Licht der Wellenlänge 650 nm und variabler Apertur  $D$ .

Bei ausschließlicher Betrachtung der Beugungseffekte kann ein Mindestdurchmesser für die Apertur in Bezug auf die Anforderungen aus **Tabelle 3.3** bestimmt werden (siehe **Tabelle 6.12**).

**Tabelle 6.12:** Mindestgröße der Apertur in Abhängigkeit des maximal zulässigen beugungsinduzierten Fehlers.

Projektion (Anbauort)	$\theta_E = \theta_{Diff}$	$D_{min}$
Design 2 (Schweller)	$< 0,002^\circ$	$> 22,7 \text{ mm}$
Sicherheit (Scheinwerfer)	$< 0,1^\circ$	$> 0,45 \text{ mm}$
Design (Außenspiegel)	$< 0,3^\circ$	$> 0,15 \text{ mm}$
Sicherheit (Außenspiegel)	$< 1^\circ$	$> 0,005 \text{ mm}$

Für einen Fehler im Winkel, der geringer als  $0,002^\circ$  ist, wäre eine (aberrationsfreie) Apertur mit einem Durchmesser größer als 22,7 mm notwendig. Bei einer F-Zahl von 2 ergibt sich somit jedoch bereits eine Systemlänge von über 45 mm. Gleichzeitig ist für die Darstellung von Design 2 ein großer Tiefenschärfebereich notwendig. Diese sind typischerweise mit kleinen Aperturen leichter zu erreichen. Der Mindestdurchmesser  $D_{min}$  für die restlichen Anwendungen (Sicherheit-Scheinwerfer und Außenspiegel sowie Design- Außenspiegel) stellt

mit weniger als 0,45 mm keine starken Restriktionen für das Design des Gesamtsystems auf.

Da der Fehler  $\theta_{ab}$  von dem expliziten Optikdesign abhängt, lassen sich allgemeine Aussagen hier nur schwer treffen. Daher findet eine tiefer gehende Untersuchung an den Prototypen in Kapitel 7 statt.

### 6.3.2 GRENZEN DER AUFLÖSUNG DURCH DEN BILDGEBER

#### *Pixelgröße abbildender Systeme*

Folgend werden die Grenzen für die verschiedenen Bildgeber evaluiert. In **Tabelle 6.13** sind Pixelgrößen unterschiedlicher (auf dem Markt verfügbarer) Systeme dargestellt. Dabei wurde jeweils ein möglichst kleiner Pixelpitch gewählt.

**Tabelle 6.13:** Überblick über die Pixelgröße unterschiedlicher auf dem Markt verfügbarer Systeme [4, 80, 85 bis 87].

Bildgeber	Name	Pixelpitch
DMD	DLP 230NP	5,4 $\mu\text{m}$
LCD	L3C07U-85G13	8,5 $\mu\text{m}$
LCoS	HED 7001	3,74 $\mu\text{m}$
$\mu\text{LED}$	EVIYOS 2.0	40 $\mu\text{m}$
Phosphorkonvertierter LASER	Forschungsprojekte	Variabel (Lichtstromabhängig)

Bei einem phosphorkonvertierten Laser ist die Spotgröße auf dem Konverter zu einem gewissen Grad variabel. Durch die begrenzte Leuchtdichte, wächst der Spotdurchmesser je nach benötigtem Lichtstrom.

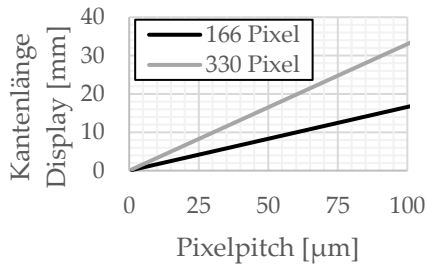
Die Evaluation geschieht in zwei Schritten: zunächst wird die notwendige Größe des Bildgebers für die Anwendung ermittelt und geprüft, ob diese aufgrund ihrer Dimension ein kompaktes System erlauben oder nicht. Im zweiten Schritt wird die Auflösung der Projektion für kleine Projektionssysteme evaluiert.

### *Größe des Displays*

Um ein Feld von  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$  mit einer Auflösung  $< 3 \text{ mm}$  zu ermöglichen, sind  $166 \times 166$  Pixel auf dem Bildgeber notwendig. Für größere Felder steigt die Anzahl der benötigten Pixel entsprechend. Für eine

Projektion mit einem Meter Seitenlänge sind  $\approx 330 \times 330$  Pixel notwendig. Für die Bewertung der Systeme werden diese beiden Fälle näher betrachtet.

In **Abbildung 6.28** ist die Mindestgröße der aktiven Fläche der Displays in Abhängigkeit zum Pixelpitch dargestellt. Um ein Display kleiner als 1 cm zu realisieren, sollte der Pitch kleiner als  $60 \mu\text{m}$  (für  $166 \times 166$  Pixel) respektive kleiner als  $33 \mu\text{m}$  ( $330 \times 330$  Pixel) sein. Mit



einer Pixelgröße wie sie von DMD- und LCoS-Systemen typischerweise erreicht wird, sind demnach kleine Displays mit hinreichend hoher Auflösung vorhanden. Je nach LCD-System sind auch diese in der Lage diese Anforderungen zu erfüllen. Die erste Generation des EVIYOS-Chips ist mit  $125 \mu\text{m}$  nicht für Designprojektionen einsetzbar. Die zweite Generation ( $40 \mu\text{m}$ ) ist in der Lage, die geringste Anforderung ( $166 \times 166$  Pixel) zu erfüllen.

**Abbildung 6.28:** Notwendige Kantenlänge des Displays in Abhängigkeit zum Pixelpitch zur Projektion von  $300 \times 300$  Pixel.

Der Zusammenhang zwischen erzeugtem Lichtstrom und Pixelgröße bei phosphorkonvertierten Systemen ist in [4] dargestellt. Die Effizienz des Projektionssystems mit  $f/\# = 2$  beträgt etwa 4%. Um 15 lm zu emittieren, werden bei gegebener Effizienz 375 lm benötigt. Dies entspricht mit einer Leuchtdichte von 2000 cd/mm<sup>2</sup> einem Pixeldurchmesser von ca. 275  $\mu\text{m}$  [4]. Um 166 x 166 Pixel zu realisieren, müsste das Display eine Kantenlänge von 4,5 cm vorweisen (siehe (6.45)). Wenn mehr Lichtstrom gefordert ist, muss der Bildgeber ebenfalls skaliert werden (bei z.B. 98 lm ergäbe sich bei 166<sup>2</sup> Pixeln eine Kantenlänge des Displays von 11,6 cm). Aufgrund der Größe der Displays sind kompakte Projektionssysteme mit den hier getätigten Annahmen nicht zu realisieren. Folgend soll ermittelt werden, ob sich bei freier Zusammensetzung von  $f$  und  $D$  ( $f/\# \neq 2$ ) ein Parameterraum ergibt, in welchem das System den Anforderungen genügen kann.

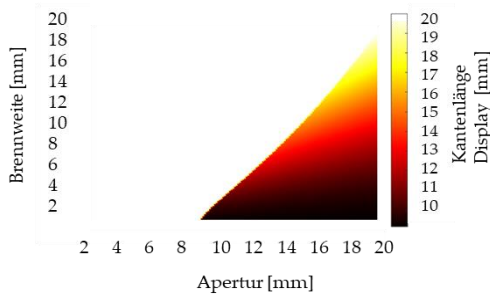
*Abschätzung des Optimierungspotentials eines phosphorkonvertierten Laserscanners*

Bei einer Leuchtdichte von 2000 cd/mm<sup>2</sup> und der gegebenen Anzahl von Pixeln (166), kann die notwendige Displaygröße  $D_{\text{Disp}}$  aus Brennweite ( $f$ ) und Apertur ( $D$ ) durch (6.45) ermittelt werden:

$$D_{\text{Disp}} = 2 \cdot 166 \cdot \sqrt{\frac{\phi_{\text{out}}}{\eta \cdot \pi^2 \cdot L_p}} = 332 \cdot \sqrt{\frac{15 \text{ lm}}{\sin^2 \left( \tan^{-1} \left( \frac{D}{2f} \right) \right) \cdot \pi^2 \cdot 2000 \frac{\text{cd}}{\text{mm}^2}}} \quad (6.45)$$



Die sich hieraus ergebenden Werte sind in **Abbildung 6.29** dargestellt. Je dunkler die Einfärbung, desto kleiner der Bildgeber.



**Abbildung 6.29:** Notwendige Kantenlänge des Displays in Abhängigkeit von der Apertur und Brennweite. Anzahl der Pixel =  $166 \times 166$ , Lichtstromoutput des Systems = 15 lm, Leuchtdichte des Phosphors =  $2000 \text{ cd/mm}^2$ .

Für kurze Brennweiten (hier: somit kurze Gegenstandsweiten) bei gleichzeitig großen Aperturen ergeben sich hohe Effizienzen, wodurch der Spot und das gesamte Display klein sein können. In dem weißen Bereich des Diagramms übersteigt die Kantenlänge des Displays den Durchmesser der Apertur. Diese Systeme wurden nicht in das Diagramm aufgenommen.

Bei einem Durchmesser der Apertur von  $D = 1 \text{ cm}$ , wäre eine Brennweite von  $f \leq 4 \text{ mm}$  notwendig, um den Anforderungen an das System zu genügen. Durch diese kurzen Brennweiten wird eine aberrationsfreie Abbildung erschwert. Wenn die Zahl der Pixel weiter steigen soll ( $330^2$  Pixel), wird die Kantenlänge gleichzeitig entspre-

chend größer und eine Umsetzung schwieriger. Die möglichen Systeme weisen alle eine F-Zahl sehr viel kleiner als eins und für große System ungefähr gleich eins vor. Eine einfache Optimierung ist demnach nicht möglich.

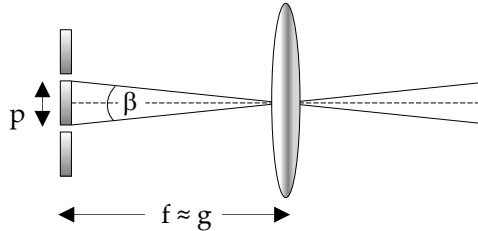
#### *Winkelauflösung der unterschiedlichen Systeme*

Im zweiten Schritt sollen die unterschiedlichen Bildgeber projekti-  
onsseitig bewertet werden. Durch die gegebenen Pixelgrößen, kann  
evaluiert werden, ob die unterschiedlichen Anforderungen mit den  
diversen Bildgebern erfüllt werden können.

Die Bildweite  $b$  ist in den hier betrachteten Fällen sehr viel größer als  
die Systemlänge und somit auch als die Gegenstandsweite  $g$ . Da ein  
reelles Bild in einer finiten Distanz oder im Unendlichen erzeugt wer-  
den soll, gilt zusätzlich:  $g \leq f$ . Aus der Abbildungsgleichung folgt mit  
der Bedingung  $b \gg f$ :

$$g = \frac{b \cdot f}{b - f} \approx f \quad (6.46)$$

In diesem Fall entspricht die Brennweite  $f$  etwa der Gegenstandsweite  $g$ .



**Abbildung 6.30:** Schematische Darstellung eines einfachen Abbildungssystems.

Die Ausdehnung eines Pixels nach der Projektion (aberrationsfreies System, Einfluss durch Beugung beachtet) berechnet sich durch:

$$\beta = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{p}{2 \cdot f} \right) + \theta_{\text{diff}} \quad (6.47)$$

Um mit einem LCoS-System (Pixelpitch  $p \approx 4 \mu\text{m}$ ) eine Winkelauflösung von  $\alpha \approx 0,002^\circ$  zu erhalten, müsste die Gegenstandsweite (entspricht der Brennweite  $f_{\text{min}}$ ) größer als 11 cm gewählt werden. In Tabelle 6.14 ist die Mindestbrennweite  $f_{\text{min}}$  dargestellt. Systeme mit einer Brennweite größer als  $f_{\text{min}}$  können ebenfalls die Anforderung erfüllen.

**Tabelle 6.14:** DMD, LCoS, LCD und  $\mu$ LED: Überblick über die notwendigen Gegenstandsweiten, um die Anforderungen an die Pixelgröße auf der Straße zu erfüllen. Es wurde jeweils ein aberrationsfreies System mit einer F-Zahl von zwei angenommen.

Projektion (Anbauort, max. Winkel)	$f_{\min}$ DMD/ LCoS $\approx 4\mu\text{m}$	$f_{\min}$ LCD 8 $\mu\text{m}$ / 35 $\mu\text{m}$	$f_{\min}$ $\mu$ LED 40 $\mu\text{m}$
Design 2 (Schweller, 0,002°)	16 cm	> 27 cm / > 105 cm	> 1,2 m
Sicherheit (Scheinwerfer, 0,1°)	> 3 mm	> 5 mm/ > 20 mm	> 23 mm
Design (Außenspiegel, 0,3°)	> 1 mm	> 1,8 mm/ > 7 mm	> 8 mm
Sicherheit (Außenspiegel, 1°)	> 0,3 mm	> 0,5 mm/ > 2 mm	> 2,3 mm

Rot eingefärbt sind dabei Systeme, die mit ihrer Größe nur schwer in ein Fahrzeug zu integrieren sind. Hier ist ersichtlich, dass die Anforderungen an eine extrem hochauflösende Projektion aus dem Schweller (Design 2) nicht erfüllt werden kann. Grün eingefärbte Systeme können aus Auflösungssicht ermöglicht werden.

Für den phosphorkonvertierten Scanner ist die Pixelgröße, wie oben beschrieben, variabel. Die notwendigen Brennweiten bei analogem

Vorgehen zu oben sind in **Tabelle 6.15** dargestellt. Im Gegensatz zu den Flächenlichtmodulatoren ergeben sich für phosphorkonvertierte Laser für alle Anwendungen Systeme, die nicht oder nur schwer zu implementieren sind. Gelb beschreibt Systeme, die sich im Grenzbereich zwischen möglicher Realisierung und nicht möglicher Realisierung befinden.

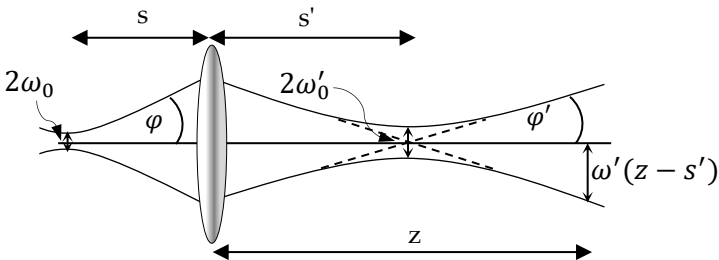
**Tabelle 6.15:** Phosphorkonvertierter Laser: Überblick über die notwendige Gegenstandsweite, um die Anforderungen an die Pixelgröße auf der Straße zu erfüllen. Es wurde jeweils ein aberrationsfreies System mit einer F-Zahl von zwei angenommen.

<b>Projektion</b> (Anbauort, Pixelgröße)	<b>Winkel der notwendigen Pixelgröße</b>	$f_{\min}$ <b>Phosphorkonvertierter Laser</b>
Design 2 (Schweller, 275 $\mu\text{m}$ )	$< 0,002^\circ$	$> 7,9 \text{ m}$
Sicherheit (Scheinwerfer, 704 $\mu\text{m}$ )	$< 0,1^\circ$	$> 0,4 \text{ m}$
Design (Außenspiegel, 275 $\mu\text{m}$ )	$< 0,3^\circ$	$> 50 \text{ mm}$
Sicherheit (Außenspiegel, 704 $\mu\text{m}$ )	$< 1^\circ$	$> 40 \text{ mm}$

*Pixelgröße Laserscanner*

In diesem Abschnitt wird ermittelt, welche Auflösung mit einem scannenden Laser erzielt werden kann.

Um Laserdioden für eine Projektion einzusetzen, ist es notwendig das von der Diode emittierte Licht zu kollimieren. In **Abbildung 6.31**, ist der Laser als Gaußsches Bündel dargestellt. Folgende Behandlung nutzt die mathematischen Definitionen des Gaußstrahls [88]. Dabei wird angenommen, dass der Astigmatismus des Lasers korrigiert ist [89].

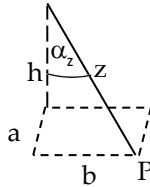


**Abbildung 6.31:** Schematische Darstellung einer Laserdiode mit einer Kollimationsoptik.

Die Pixelgröße  $S$  des Lasers auf der Straße ist von verschiedenen Parametern abhängig. Der Durchmesser des Laserspots im Punkt P (**Abbildung 6.32**) kann über:

$$S(z, s', \alpha_z) = \frac{2 \cdot \omega'(z - s')}{\cos(\alpha_z)} \quad (6.48)$$

bestimmt werden.



**Abbildung 6.32:** Skizzierung der gewählten Variablen. Die Höhe des Projektionssystems wird durch  $h$  beschrieben, der Abstand zu  $P$  in „y-Richtung“ durch  $a$  und in „x-Richtung“ durch  $b$ .

Wie aus **Abbildung 6.32** ersichtlich, ist die Spotgröße von der Anbau-  
position (definiert durch  $a$ ,  $b$  und  $h$ ) und dem damit verbundenen  
Projektionswinkel  $\alpha_z$  abhängig, welcher durch:

$$\alpha_z = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{h} \right) \quad (6.49)$$

bestimmt werden kann. Dabei gibt  $\omega'(z-s')$  den halben Durchmesser  
des Gaußstrahles in der Entfernung  $z$  von der Projektionsoptik an  
(dabei muss beachtet werden, dass sich die Strahltaile in der Distanz  
 $s'$  vor dem Projektionssystem befindet).

$$\omega'(z-s') = \omega'_0 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{z-s'}{z'_0} \right)^2} \quad (6.50)$$

Der Ort der abgebildeten Strahltaile  $s'$  lässt sich durch:

$$s' = f + \frac{f^2 \cdot (s-f)}{(s-f)^2 + z_0^2} \quad (6.51)$$

beschreiben. Die transformierte Strahltaile kann über:

$$\omega'_{0} = \omega_{0} \cdot f \cdot \sqrt{\frac{1}{(s - f)^2 + z_{0}^2}} \quad (6.52)$$

mit:

$$z_{0} = \frac{\omega_{0}^2 \cdot \pi}{M^2 \cdot \lambda} \quad (6.53)$$

bestimmt werden. Dabei ist  $M^2$  die Beugungsmaßzahl. Singlemode-Laserdioden können sehr kleine Beugungsmaßzahlen vorweisen. Hier werden Werte für  $M^2 < 3$  erreicht [90, 91]. Um eine Maximalabschätzung zu ermöglichen, wird  $M^2 = 1$  gesetzt. In der Realität kann dieser Faktor je nach genutzter Laserdiode auch sehr viel größer sein.

Mit den Formeln (6.49) - (6.53) kann die Pixelgröße in Abhängigkeit von den Eingangsparametern  $f$ ,  $\lambda$ ,  $s$ ,  $\omega_0$  bestimmt werden.

Für nachfolgende Visualisierungen wird  $\lambda = 650$  nm gesetzt. Als Variable wird die Eingangsstrahltaile verwendet, so dass sich die Pixelgröße  $S$  durch:

$$S(\omega_0) = \frac{2 \cdot \omega'_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{(z - s') \cdot \lambda}{\omega'^2_0 \cdot \pi}\right)^2}}{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{h}\right)\right)} \quad (6.54)$$

berechnen lässt (vereinfachend wurde nur die Abhängigkeit von den  $\omega_0$  dargestellt).  $\omega'_0$  kann durch (6.52) und (6.53) ermittelt werden. Für

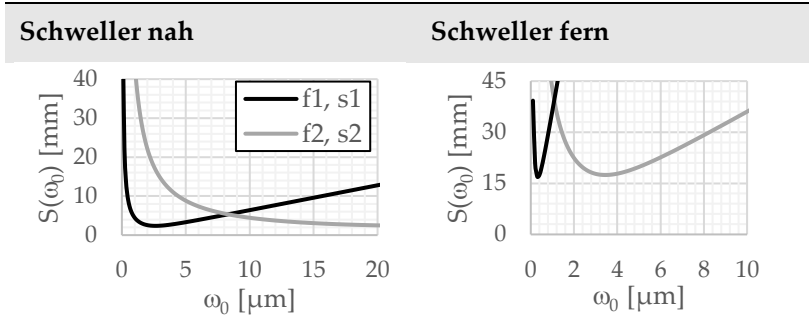


die Berechnung der Pixelgröße wurden unterschiedlichen Variablen festgelegt (**Tabelle 6.16**).

**Tabelle 6.16:** Überblick über die verschiedenen Variablen

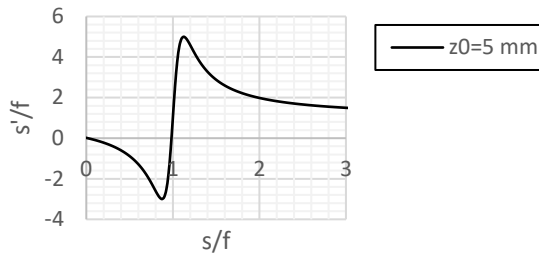
Variable	Wert
a/ b/ h (Schweller, nah)	0,5 m/ 0 m/ 0,2 m
a/ b/ h (Schweller, fern)	0,5 m/ 4 m/ 0,2 m
$f_1$	4,5 mm
$s_1$	4,5045 mm
$f_2$	45 mm
$s_2$	45,45 mm
$\lambda$	650 nm
$M^2$	1

In **Abbildung 6.33** ist der Verlauf der Pixelgröße für unterschiedliche Eingangsstrahltaillen ( $\omega_0$ ) sowie verschiedenen Brenn- und Gegenstandsweiten ( $f_i, s_i$ ) dargestellt. Für den Fall „Schweller nah“ ergeben sich Pixelgrößen  $S(\omega_0) < 3$  mm für beide Systeme. Für den Fall „Schweller fern“ ergeben sich größere Pixel (im Bereich zwischen 10 mm – 20 mm) auf der Projektionsfläche. Es ist zu beachten, dass das Minimum für die beiden Fälle verschiedene Eingangsstrahltaillen  $\omega_0$  erfordert. Somit kann das System nur für einen der beiden Fälle oder eine intermediäre Lösung optimiert werden.



**Abbildung 6.33:** Grafische Darstellung der Ausdehnung eines Pixels auf der Straße mit den in **Tabelle 6.16** gegebenen Variablen.  $f_1=4,5$  mm,  $s_1=4,5045$  mm,  $f_2=45$  mm,  $s_2=45,045$  mm. Links: Pixelgröße für Projektionen in der Nähe des Schwellers ( $a/b/h=0,5$  m/ 0 m/ 0,2 m). Rechts: Pixelgröße für Projektionen in der Nähe des Schwellers ( $a/b/h=0,5$  m/ 4 m/ 0,2 m).

Der Fall Gegenstandsweite  $\approx$  Brennweite entspricht  $s/f \approx 1$ . Eine geringe Verschiebung der Strahltilde  $s$ , kann zu einer sehr starken Verschiebung des Ortes der Ausgangsstrahltilde  $s'$  führen. Wie aus **Abbildung 6.34** ersichtlich, ergeben sich für kleine Verschiebungen  $s/f=1-\delta$  und  $s/f=1+\delta$  sehr große Unterschiede für  $s'/f$ . Kleine Toleranzen zeigen somit große Auswirkungen auf den Ort der Strahltilde und somit ebenso auf die Ausdehnung  $S$  des Pixels. Systeme, welche eine Brennweite vorweisen, die mit der Gegenstandsweite identisch oder ähnlich ist, sind somit toleranzempfindlicher.



**Abbildung 6.34:** Lage der Strahlteile für unterschiedliche Werte von  $s/f$ . Die Rayleighlänge beträgt in diesem Beispiel 5 mm, die Brennweite  $f = 4$  cm.

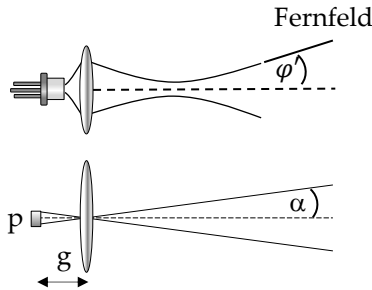
In **Tabelle 6.17** sind für unterschiedliche Einbauorte und Projektionsdistanzen die ermittelten Pixelgrößen dargestellt. Für das Projektionssystem wurde jeweils  $f_2$  und  $s_2$  genutzt.

**Tabelle 6.17:** Optimierte Pixelgröße  $S_{\min}^*$  des Lasers für unterschiedliche Einbauorte, dabei wurde  $f_2 = 45$  mm und  $s_2 = 45,045$  mm genutzt.

Einbauort	h	a	b	$S_{\min}^*$
Außenspiegel	1 m	0,5 m	0,5 m	$\approx 1,5$ mm
Scheinwerfer	0,75 m	0 m	3 m	$\approx 5,3$ mm
Schweller 1	0,2 m	0,5 m	0 m	$\approx 2,3$ mm
Schweller 2	0,2 m	0,5 m	4 m	$\approx 1,7$ cm

Vergleich eines scannenden mit einem abbildenden System

Der schematische Aufbau der beiden Systeme ist in **Abbildung 6.35** dargestellt. Die für den Vergleich notwendigen Variablen sind dort ebenfalls eingezeichnet.



**Abbildung 6.35:** Vergleich der Systeme „scannendes“ und „abbildendes System“.

Der kleinste Pitch für pixelbasierte Amplitudenmodulatoren liegt aktuell im Bereich um  $4 \mu\text{m}$ . Unter Vernachlässigung der Aberrationen lässt sich die Winkelauflösung des Systems durch:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{p}{2g} \right) \quad (6.55)$$

berechnen. Für ein Lasersystem ist die Winkelauflösung  $\varphi$  im Fernfeld ( $z \gg z_0$ ) durch:

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda}{\pi \cdot \omega'_0} \right) \quad (6.56)$$

gegeben.

Durch Gleichsetzen der beiden Winkel ( $\varphi'$  und  $\alpha$ ), kann mit (6.53) die Rayleighlänge ermittelt werden, die notwendig ist, damit ein scanendes System eine höhere Auflösung erzielt als ein aberrationsfreies Projektionssystem mit pixeliertem Bildgeber:

$$\begin{aligned}
 \varphi' &= \alpha \\
 \rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi \cdot \omega'_0}\right) &= \tan^{-1}\left(\frac{p}{2g}\right) \\
 \rightarrow \omega'_0 &= \frac{2\lambda \cdot g}{\pi \cdot p} \\
 \rightarrow z'_0 &= \left(\frac{2g}{p}\right)^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi}
 \end{aligned}
 \tag{6.57}$$

Bei einer Wellenlänge von 650 nm, einer Gegenstandsweite  $g = 2$  cm, dem Pitch  $p = 4 \mu\text{m}$ , ergibt sich für die Rayleighlänge ein Wert von  $z'_0 = 20$  m. Ab einer Projektionsdistanz von  $z \gg z'_0$  (Fernfeld) ist das Laserprojektionssystem in der Auflösung (und einer hohen Strahlqualität  $M^2 = 1$ ) überlegen gegenüber einem LCoS oder DMD Projektionssystem. Zu beachten ist, dass der Pixelpitch quadratisch in die Rayleighlänge eingeht. Dadurch verringert sich diese bei einer Verdopplung von  $p$  (von  $4 \mu\text{m}$  auf  $8 \mu\text{m}$ ) von 20 m auf 5 m. Da in dieser Abschätzung nur die Ausgangsparameter der Strahltaile verwendet wurden, ist die Lage der Strahltaile  $s'$  unbekannt. Es wird jedoch angenommen, dass die Lage der Strahltaile  $s'$  für eine Vielzahl an Konfigurationen sehr viel kleiner als der Abstand  $z$  zur Projektion ist. Diese Annahme kann mit Hilfe von **Abbildung 6.34** begründet werden. Wenn  $s/f$  größer als 1 ist, nähert sich  $s'/f$  dem Wert 1. Die Lage der abgebildeten Strahltaile liegt somit im Abstand einer Brenn-

weite. In dem Fall, dass die Brennweite kurz ist gegenüber der Projektionsentfernung ( $f \ll z$ ), folgt somit, dass die Strahltaile relativ nah an der Optik verortet ist ( $s' \ll z$ ).

### *Fazit zum Auflösungsvermögen der unterschiedlichen Systeme*

Wie aus **Tabelle 6.14** ersichtlich, sind DMD-, LCoS-, LCD- und  $\mu$ LED-Systeme (EVIYOS 2.0, Pixelpitch  $\approx 40 \mu\text{m}$ ) in der Lage, die Anforderungen hinsichtlich der Auflösung zu erfüllen. Laserscanner sind ebenso in der Lage hohe Auflösungen zu erzielen. Die Spotgrößen von phosphorkonvertierten Scannern erlauben keine kompakten, hochauflösende Systeme. Das gleiche gilt für  $\mu$ LED-Systeme mit einem Pixelpitch  $\geq 125 \mu\text{m}$  (EVIYOS). Die notwendigen Displaygrößen führen zu Systemen, die schwer in kompakte Bauräume zu integrieren sind. Die Anforderung an die Designprojektion 2 (aus dem Schweller) lässt sich mit keiner der vorhandenen Technologien ermöglichen. Die restlichen Anforderungsszenarien können durch die die verschiedenen Projektionssysteme erfüllt werden.

## 6.4 AUSWAHL DER SYSTEME

In Kapitel 3 wurden die Anforderungen an die Projektionssysteme beschrieben. Mit den Erkenntnissen aus Kapitel 6 können die unterschiedlichen Systeme anhand der erstellten Szenarien bewertet werden.

Folgend wird das Vorgehen zur Bewertung der verschiedenen Systeme anhand von zwei Beispielen erläutert.

### *Designprojektion aus dem Außenspiegel – LED, LCoS*

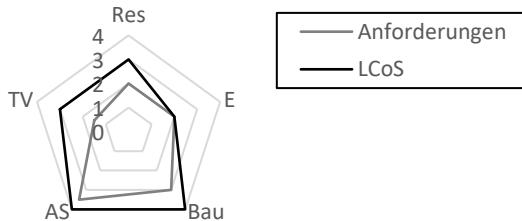
Die Bewertung des Systems geschieht anhand der Kriterien Auflösung (*Res*), notwendige Beleuchtungsstärke (*E*), Anforderung an den Bauraum (*Bau*), Augensicherheit (*AS*) und thermische Verfügbarkeit (*TV*). Die Farbdarstellung und der Kontrast werden anhand der Prototypen ermittelt. Weitere Anforderungen, wie zum Beispiel die Farbwiedergabe oder der Kontrast, werden anhand der Prototypen evaluiert.

Die Anforderungen für eine Designprojektion sind aus Kapitel 3 bekannt. Um die notwendige Auflösung zu erzielen, müssen für diese Projektion (0,5 m x 0,5 m, Pixelgröße 3 mm) mindestens 166 x 166 Pixel zur Verfügung gestellt werden. Bei einem Pixelpitch von 4  $\mu\text{m}$  ist ein Display mit einer Kantenlänge  $< 1$  mm in der Lage, die Anforderungen zu erfüllen (reine Betrachtung der Auflösung). Bei entspre-

chender Dimensionierung des Systems ( $F$ -Zahl = 2, Gegenstandsweite  $\approx$  Brennweite) kann eine Auflösung von  $< 0,1^\circ$  ermittelt werden. Somit wird hier  $Res = 3$  ermittelt (vgl. **Tabelle 3.3**).

Da die Bewertung des notwendigen Bauraums nicht unabhängig von dem Lichtstrom geschehen kann, wird das zu bewertende System so ausgelegt, dass es die Anforderung (wenn möglich) an die Beleuchtungsstärke erfüllt. In diesem Fall sind 15 lm Lichtstrom notwendig und realisierbar. Dieses System bekommt somit für  $E$  den Wert 3 zugeordnet. Das hierfür notwendige Volumen (inklusive Kühlkörper) ergibt sich für ein LCoS-LED-System nach **Abbildung 6.24** zu  $< 10 \text{ cm}^2$  wodurch für  $Bau = 4$  folgt. Da es sich um ein LED-System mit einem Flächenmodulator handelt, sind vergleichsweise geringe Intensitäten im Projektionsfeld zu erwarten, wodurch das System als augensicher ohne Einschränkungen eingestuft werden kann ( $AS = 4$ ). Bei der thermischen Verfügbarkeit wurde das System auf eine Laufzeit von 300 s ausgelegt. Somit ergibt sich  $TV = 3$ . Bei Systemen, welche eine aktive Kühlung benötigen ( $TV = 0$ ) wird der Wert für  $Bau$  um eins vermindert, wodurch das zusätzliche Volumen durch die Integration eines komplexen Kühlkonzeptes grob mitbetrachtet wird. In **Abbildung 6.36** sind die Werte des LCoS-Systems für eine Design-Projektion aus dem Außenspiegel gegenüber den Szenario-typischen Anforderungen dargestellt.





**Abbildung 6.36:** Vergleich der Anforderungen sowie der Bewertung des LCoS-Systems für eine *Designprojektion aus dem Außenspiegel*.

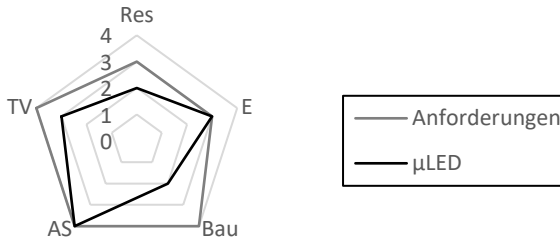
Wie zu erkennen ist, sind die Werte des Systems jeweils größer oder gleich den Anforderungen. Somit kann dieses System mit großer Wahrscheinlichkeit für eine Designprojektion aus dem Außenspiegel umgesetzt werden.

#### *Sicherheitsprojektion aus dem Schweller – $\mu$ LED*

Ein Beispiel, welches den Anforderungen nicht genügt, ist eine Sicherheitsprojektion aus dem Schweller mit einem  $\mu$ LED-System.

Die Anforderungen aus Kapitel 3.10 sind ebenso in **Abbildung 6.37** dargestellt. Analog zum Vorgehen bei dem LCoS-System wurden die Werte für das Spinnennetzdiagramm für das  $\mu$ LED-System erstellt. In den Punkten Auflösung, thermische Verfügbarkeit sowie Bau-raum erfüllt das System nicht die Anforderungen. Somit wird das

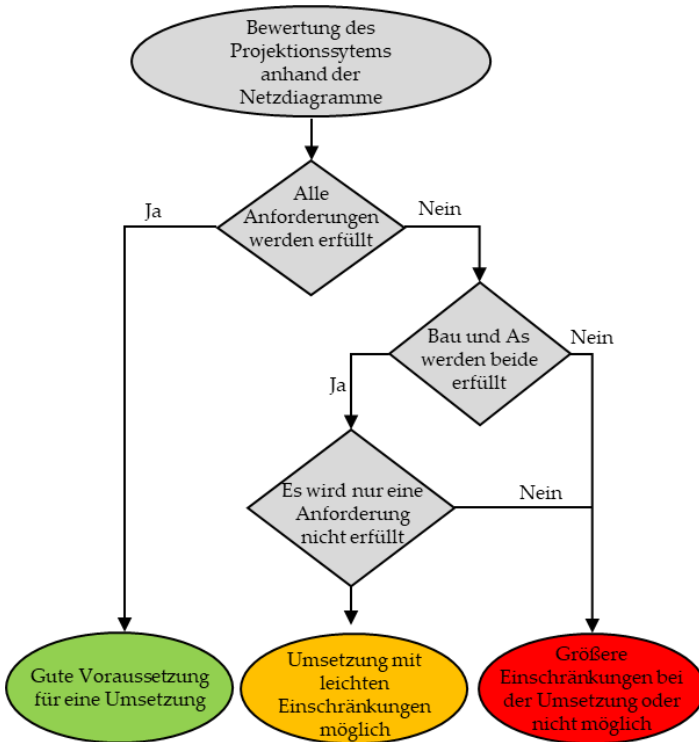
$\mu$ LED-System für eine Sicherheitsprojektion aus dem Schwellenwert nicht favorisiert.



**Abbildung 6.37:** Vergleich der Anforderungen sowie der Bewertung des  $\mu$ LED-Systems für eine *Sicherheitsprojektion aus dem Schwellenwert*.

Durch diese Vorgehensweise, können die unterschiedlichen Systeme hinsichtlich der verschiedenen Anforderungen bewertet werden. Die Bewertung der unterschiedlichen Systeme geschieht anhand des in **Abbildung 6.38** dargestellten Entscheidungsdiagramms. Bei der Bewertung werden die Systeme in drei Kategorien eingeteilt. Projektoren, welche alle Anforderungen erfüllen, fallen in die grüne Kategorie. Eine erfolgreiche Umsetzung dieser Systeme ist wahrscheinlich möglich. Die Kategorie „Bau“ wird als „hartes Kriterium“ gewertet. Bei Nichterfüllung dieses Kriteriums wird das System in die rote Kategorie eingeordnet. Eine Umsetzung ist unwahrscheinlich. Wenn „Bau“ erfüllt wird, kann das System mit einer nicht erfüllten Kategorie durch leichte Modifikation des Systems oder der Anforderungen zum Einsatz kommen. Somit wird es in die gelbe Kategorie eingeteilt.

Wenn zwei oder mehr Anforderungen nicht erfüllt werden, wird das System ebenso in die rote Kategorie eingeordnet.



**Abbildung 6.38:** Entscheidungsdiagramm für die Wahl der Projektionssysteme.

Die Bewertung der verschiedenen Systeme für die unterschiedlichen Anwendungen kann in Anhang B.7 gefunden werden. In **Tabelle 6.18** ist eine Übersicht über die Nutzbarkeit der Systeme für eine Vielzahl von Anwendungen dargestellt.

**Tabelle 6.18:** Zusammenfassung der Bewertung der unterschiedlichen Projektionssysteme hinsichtlich der verschiedenen Anforderungen. \*steht dabei für ein realisierbares (grün) Lasersystem (Bildgeber + RGB-Laser), \*\* ein Lasersystem (Bildgeber + RGB-Laser), welches mit leichten Einschränkungen umgesetzt werden kann (gelb).

	DMD	LCD	LCoS	µLED	Phosphor	RGB- Laser-Scanner
<b>Design</b>						
Außenspiegel	**	**	**			
Schweller I						
Schweller II						
Scheinwerfer	*	*	*			
<b>Sicherheit (Nacht)</b>						
Außenspiegel						
Schweller						
Scheinwerfer						
<b>Sicherheit (Tag)</b>						
Außenspiegel						
Schweller						
Scheinwerfer						

Interaktion						
Außenspiegel						
Schweller						
HAF						
Scheinwerfer						

Die DMD-Technologie in Kombination mit einer LED ermöglicht in verschiedenen Fällen ein zu realisierendes System (3 x grün, 2 x gelb). Das LCoS-System und das LCD-System sind (mit 3 x grün und 1 x gelb respektive 2 x grün 1 x grün, 4 x gelb) für unterschiedliche Anwendungen einsetzbar.

Das RGB-Laserscannersystem ist unter Vernachlässigung der Augensicherheit das einzige System, welches (mit einer aktiven Kühlung) Projektionen ermöglichen kann, die auch bei sehr hohen Umgebungsbeleuchtungsstärken gesehen werden können.

Als ein vielversprechendes System werden ein LCoS-System sowie ein DMD-Projektionssystem gewählt. Dabei sollen mit dem prototypischen LCoS-System die Grenzen bei einer Projektion aus dem Außenspiegel sowie mit dem DMD-System die Grenzen bei einer Projektion aus dem Schweller ermittelt werden.

## Kapitel 7

# PROTOTYPISCHE UMSETZUNG, ANALYSE UND BEWERTUNG IM AN- WENDUNGSFALL

## 7.1 LED-LCoS

Folgend wird ein LED-LCoS-System untersucht. Dabei wird evaluiert, ob das System in der Lage ist, die Anforderungen für eine Projektion eines Designs aus dem Seitenspiegel zu ermöglichen. Darüber hinaus soll der Einfluss der unterschiedlichen polarisierenden Strahlteiler auf die Effizienz und den Kontrast untersucht werden.

### 7.1.1 AUSLEGUNG DES SYSTEMS

#### *Wahl des Bildgebers*

Als Bildgeber wurde der HED 2220 von Holoeye gewählt [92].

Die wichtigsten Daten sind in **Tabelle 7.1** dargestellt.

**Tabelle 7.1:** Überblick über die wichtigsten Daten des Bildgebers HED 2220 von Holoeye.

Auflösung	1920 x 1080
Aktive Fläche	8,64 x 4,86 mm <sup>2</sup>
Füllfaktor	91%
Pixelpitch	4,5 µm
Reflektivität	65 % (typ.)

Die oben beschriebenen Anforderungen bezüglich Größe sowie Pixelpitch des Bildgebers werden erfüllt.

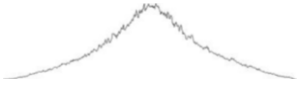

#### *Wahl der LED und Beleuchtungsoptik*

Der Prototyp wurde mit der LED „KW CULNM1.TG“ aufgebaut. Diese kann bei einer geringen Fläche (1 mm<sup>2</sup>) einen hohen Lichtstrom bereitstellen. Bei einer Bestromung von einem Ampere werden 308 lm Lichtstrom emittiert.

In Abschnitt 6.1.1 wurde auf die Wahl der Beleuchtungsoptik eingegangen. Wie beschrieben, sollen die unterschiedlichen Systeme „Refraktive Optik“ sowie „TIR-Optik“ tiefer untersucht und hinsichtlich Effizienz und Homogenität der Ausleuchtung miteinander verglichen werden. Bei der rein refraktiven Optik handelt es sich im vorliegenden Fall um ein zweilinsiges Beleuchtungssystem. In **Tabelle 7.2**

ist die Systemeffizienz  $\eta_{\text{Sys}}$  der unterschiedlichen Beleuchtungsoptiken sowie ein Schnitt durch die Beleuchtungsstärke in einer Projektionsentfernung von einem Meter dargestellt.

**Tabelle 7.2:** Darstellung der Systemeffizienz für unterschiedliche Beleuchtungskonzepte und Homogenität (lineare Skalierung der Achsen)

System	$\eta_{\text{Sys}}$	Beleuchtungsstärke (qualitativer Schnitt)
TIR-Optik	9,1 %	
2-linsiges Beleuchtungssystem	9,6 %	

---

Aus **Tabelle 7.2** geht hervor, dass die Effizienzen nur um 0,5 Prozentpunkte voneinander abweichen. Ebenso ist ersichtlich, dass sich für die TIR-Optik in diesem Fall eine vergleichsweise inhomogene Ausleuchtung ergibt. Im Zentrum der Projektion ergibt sich ein ausgeprägtes Maximum in der Beleuchtungsstärke. Das FWHM ist für die TIR-Optik doppelt so groß wie für den zweilinsigen Kollimator. Anhand dieser Auswertung wird für den Prototypen die zweistufige Kollimation gewählt. Diese zeigt im Vergleich zur TIR-Optik zwar



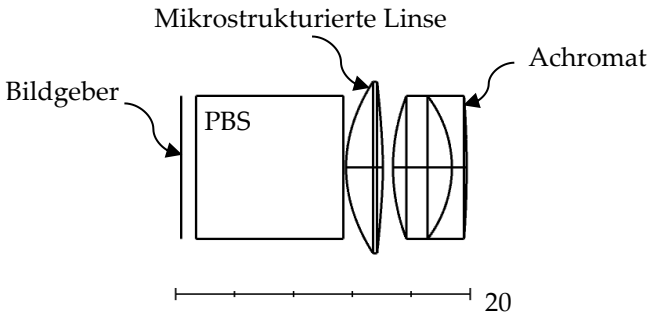
eine etwas größere Systemlänge, ist in der Effizienz ähnlich und in der homogenen Ausleuchtung des Chips überlegen.

#### *Wahl des Strahlteilers*

Für den Prototypen wurde ein 10mm VIS, Polarizing Cube Beamsplitter [93] (Wiregridpolarisator) und ein dielektrischer Polarisator [94] gewählt, um diese im Experiment zu untersuchen und vergleichen zu können. Die Kantenlänge der Strahlteilerwürfel liegt bei jeweils 10 mm.

#### *Wahl des optischen Systems*

Die Länge des Gesamtsystems sollte (ohne Kühlung) nicht viel größer als 2 cm sein. Um die Aberrationen möglichst gering zu halten, wird für den vorliegenden Prototypen ein dreilinsiges System gewählt, wie in **Abbildung 7.1** dargestellt. Dieses System setzt sich aus einem zweilinsigen Achromaten sowie einer mikrostrukturierten Linse zusammen.

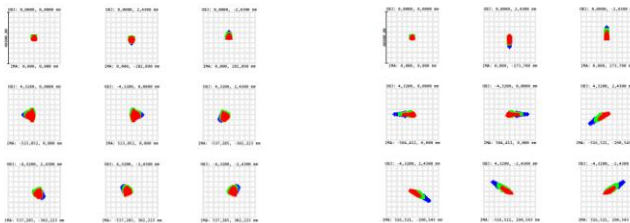


**Abbildung 7.1:** 2D-Ansicht des optischen Systems inklusive PBS sowie LCoS-Bildgeber.

Durch die Mikrostruktur auf der Linse, werden die Aberrationen in ihrer maximalen Ausdehnung (RMS) etwa um den Faktor 1,6 verringert (vergleiche hierzu **Abbildung 7.2**).

Mit diffraktiver Struktur

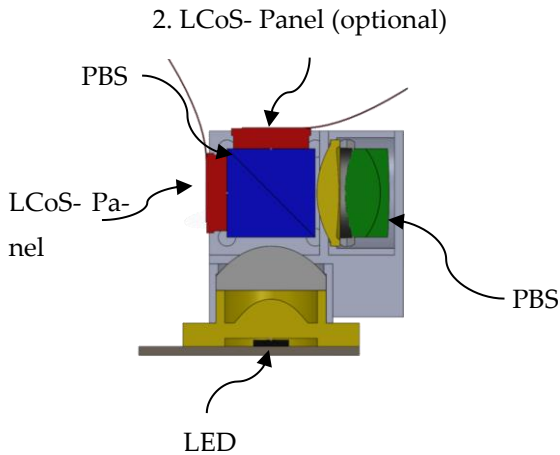
Ohne diffraktive Struktur



**Abbildung 7.2:** Vergleich des RMS-Spotradius mit unterschiedlichen Wellenlängen (486 nm, 587 nm, 656 nm).

Die Aberrationen sind für dieses System im Randgebiet der Bildebene leicht größer als die ermittelten 3 mm. Der maximale Spotdurchmesser ergibt sich in der Simulation zu 4,4 mm in Randbereichen der Abbildung (**Abbildung 7.1**, links). In einem Großteil des Bildes wird die Vorgabe jedoch erfüllt, weshalb die Abbildungsqualität des vorliegenden Systems als hinreichend bewertet wurde.

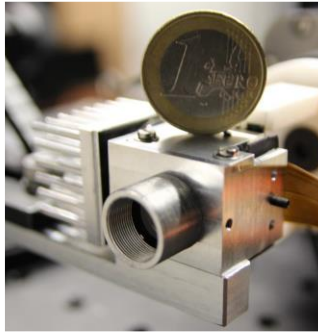
In **Abbildung 7.3** ist ein CAD-Modell des Prototyps dargestellt. Optional kann neben dem ersten LCoS-Panel ein zweites Panel nach dem polarisierenden Strahlteiler implementiert werden, wodurch sich eine Verdopplung der Effizienz einstellen kann.



**Abbildung 7.3:** CAD-Modell des Prototyps.

### 7.1.2 VERMESSUNG DES PROTOTYPEN

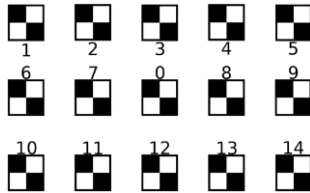
In **Abbildung 7.4** ist ein Bild des prototypischen Aufbaus mit einer Euro-Münze als Größenvergleich dargestellt.



**Abbildung 7.4:** Bild des Prototyps, zum Größenvergleich ist eine Euromünze auf den Projektor gestellt.

Untersucht und bewertet werden im Folgenden die Abbildungsqualität, die Beleuchtungsstärke bzw. der Lichtstromoutput, der Kontrast und die Farbe der Projektion des Projektionssystems mit unterschiedlichen Strahlteilern. Weiterhin wird der Einfluss zusätzlicher Blenden auf den Kontrast und der Effizienz untersucht.

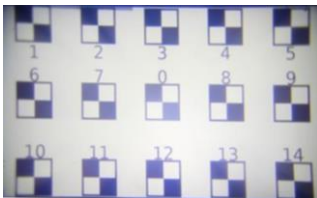
Um die Effekte der verschiedenen Beamsplitter vergleichen zu können, wurde eine Testgrafik (siehe **Abbildung 7.5**) mit unterschiedlichen Strahlteilern auf eine in einem Meter entfernte Fläche projiziert und vermessen.



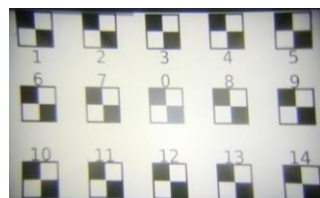
**Abbildung 7.5:** Testmuster, um Beleuchtungsstärken und ortsabhängige Kontraste zu vermessen.

Da die Polarisatoren aus unterschiedlichen Materialien bestehen (der Wiregrid Polarisator aus N-BK7 [93], der dielektrische aus N-SF11 [94]) ergeben sich durch die unterschiedlichen Brechungsindizes der Materialien (1,518 respektive 1,79 bei 555 nm [95]) verschiedene Öffnungswinkel der Systeme. Folglich ist die Geometrie der Projektionen in der Distanz von einem Meter für die verschiedenen Technologien unterschiedlich dimensioniert. Die projizierten Bilder sind in **Abbildung 7.6** dargestellt.

Dielektrischer Polarisator



Wiregrid Polarisator



**Abbildung 7.6:** Vergleich der Projektion mit den unterschiedlichen Strahlteilern. Links: der dielektrische Strahlteiler Polarisator, rechts: der Wiregrid Polarisator.

*Beleuchtungsstärke*

Aufgrund der kleineren Projektionsfläche ist die Beleuchtungsstärke für das dielektrische System durchschnittlich etwa doppelt so hoch wie die des Wiregrid-Systems (siehe **Tabelle 7.4** und **Tabelle B 5**). Für eine bessere Vergleichbarkeit der Systeme kann der Lichtstrom oder die Effizienz herangezogen werden. Für das Wiregrid-System ergibt sich eine Effizienz von  $\approx 9\%$  und einem Lichtstromoutput von 27 lm. Das dielektrische System weist mit einem Lichtstrom von 35 lm eine leicht höhere Effizienz vor ( $\approx 11,3\%$ ). Die Werte sind in **Tabelle 7.3** dargestellt.

**Tabelle 7.3:** Lichtstrom und Kontrast unterschiedlicher Projektionssysteme (emittierter Lichtstrom der LED = 308 lm).

	LCoS + Wiregrid	LCoS + dielektrisch
A	1 x 0,6 m <sup>2</sup>	0,84 x 0,47 m <sup>2</sup>
E <sub>max</sub> (weiß)	65 lx	120 lx
E <sub>min</sub> (weiß)	28,9 lx	61 lx
E <sub>mean</sub>	45 lx	88,6 lx
$\phi_{\text{out}}$	27 lm	35 lm
$\eta$	9 %	11,6 %

*Kontrast*

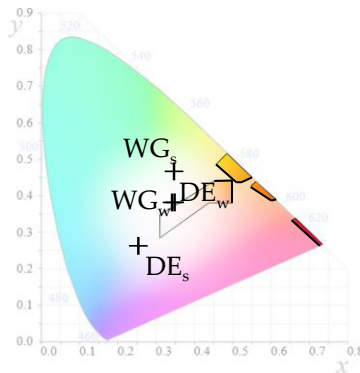
Um den Kontrast der Projektion bewerten zu können, wurden für die 14 Felder jeweils die Beleuchtungsstärken in den oberen beiden Felder für  $E_{\text{PBS},x}$  (weiß) und  $E_{\text{PBS},x}$  (schwarz) gemessen ( $\text{PBS} \in [\text{DE}, \text{WG}]$ ,  $x \in [0, \dots, 14]$ ). Der Kontrast wurde durch Bildung der jeweiligen Quotienten (z.B.  $E_{\text{DE},5}(\text{weiß})/E_{\text{DE},5}(\text{schwarz})$ ) berechnet (siehe **Tabelle B 5**). In **Tabelle 7.3** sind die minimalen Kontraste  $K_{\text{min}}$  und die durchschnittlichen Kontraste  $K_{\text{mean}}$  für unterschiedliche Systemkonfigurationen zusammen mit dem Lichtstromoutput  $\phi_{\text{out}}$  dargestellt. Neben der Standardkonfiguration wurde zusätzlich noch ein Vorpolarisator in den Strahlengang eingefügt. Der Einfluss auf die Kontraste und den vom Projektor emittierten Lichtstrom ist in **Tabelle 7.4** zusammengefasst.

**Tabelle 7.4:** Lichtstrom und Kontrast unterschiedlicher Projektionssysteme

System	$\Phi_{\text{out}}$	$K_{\text{min}}$	$K_{\text{mean}}$
Dielektrisch	35 lm	3,8	5,3
Wiregrid	27 lm	4,0	7,0
Dielektrisch + Prepolarisator	24,5 lm	4,8	9,3
Wiregrid + Prepolarisator	18,5 lm	4,4	9,5

### *Farbe der Projektion*

Aufgrund der unterschiedlichen Technologien ergeben sich unterschiedliche Farbeindrücke, je nachdem, welcher Polarisator verwendet wird. In **Abbildung 7.7** sind die Ergebnisse der Spektralmessungen im Zentrum der Projektion (Feld 0) dargestellt. Zum Vergleich ist der erlaubte ECE-Farbraum dargestellt.  $WG_s$  markiert die  $c_x$ - und  $c_y$ -Koordinaten im Farbraum des LCoS-Systems mit Wiregridpolarisator (WG, DE für dielektrisch) im schwarzen Feld (s, w für „weiß“).



**Abbildung 7.7:** Farbkoordinaten für das dielektrische System (DE) und dem Wiregrid (WG) im weißen Bereich (Index w) bzw. dem schwarzen Bereich (Index s) der Projektion.



### 7.1.3 BEWERTUNG DES LCoS-LED-PROJEKTIONSSYSTEMS

Die Bewertung des Systems geschieht anhand der Bewertungskriterien, die sich für eine „*Designprojektion Außenspiegel*“ ergeben.

Die theoretische Einordnung bzgl. der Auflösung konnte bestätigt werden. Mit dem LCoS-System lassen sich mit einem simplen optischen Aufbau Bilder mit einer hochauflösenden Projektion realisieren. Der Pixeldurchmesser auf dem Projektionsfeld ist im Großteil des Projektionsfeldes (trotz Aberration) kleiner als 3 mm und es lassen sich hochwertige Grafiken erzeugen. Die Anforderung an die Beleuchtungsstärke kann mit einem Lichtstromoutput  $> 15$  lm theoretisch von beiden Systemen erzielt werden. Hierfür wäre jedoch eine Adaption des optischen Systems notwendig. In der vorliegenden Konfiguration ist der Durchmesser der Projektionsfelder größer als das, was gefordert wurde. Dennoch erfüllt das dielektrische System die Anforderung nur in den Randbereichen nicht ( $E_{\min} = 61 \text{ lx} < 65 \text{ lx}$ ). Das Wiregrid-System kann im Zentrum der Projektion mit  $E_{\max} = 65 \text{ lx}$  die Anforderung exakt erfüllen. Jedoch sind jegliche Bereiche außerhalb des Zentrums der Projektion unterhalb der geforderten 65 lx. Der Bauraum des Systems ist mit  $\approx 2,5 \times 3 \times 5 \text{ cm}^3 = 37,5 \text{ cm}^3$  kleiner als der ermittelte Grenzwert des Bauraums ( $50 \text{ cm}^3$ ) (Elektronik für die Ansteuerung ausgelagert). Ein Langzeitbetrieb  $> 180$  min bei einer Umgebungstemperatur von ca.  $25^\circ\text{C}$  war mit diesem System (freie Konvektion) problemlos möglich. Der Kontrast des Projektionssystems befindet sich im unteren Grenzbereich. Nach **Tabelle 3.10** liegt die minimale Kontrastanforderung bei 5:1 für den Nachtzustand.

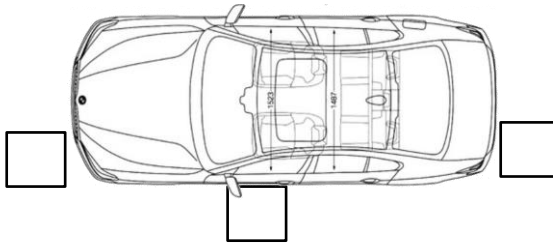
Dieser wird im Mittel erreicht, jedoch für einige Systeme im Zentrum der Projektion (Verortung von  $K_{\min}$ ) unterschritten. Zusätzliche Elemente (Pre- oder Postpolarisatoren) können bei einer Effizienzmin- derung den durchschnittlichen Kontrast stark anheben. Die Farbe der Projektion im Weißbereich ist sehr nah am ECE-Bereich lokalisiert, jedoch ist der Farbshift in abgedunkelten Projektionsbereichen teil- weise extrem. Eine Minimierung dieser Farbeffekte ist notwendig, damit das System im Automobilbereich eingesetzt werden kann.

Ein Großteil der Anforderungen kann durch das System erfüllt wer- den und ist somit ein geeigneter Kandidat für eine „*Designprojektion aus dem Außenspiegel*“. Grenzen zeigen sich in der Farbwiedergabe so- wie im Kontrast. Diese sind stark abhängig von dem polarisierenden Element. Somit ist es eine wichtige Aufgabe einen adäquaten Strahl- teiler für das System zu finden, der ebenso die Anforderungen im Preis erfüllen kann.

## 7.2 LED-DMD

Ein weiteres System, welches für Designzwecke verwendet werden kann, ist die Kombination einer LED mit einem DMD. Der große Vor- teil dieses Systems ist die Verfügbarkeit Automotive-zertifizierte Chips, wodurch ein schneller Einsatz in Serie denkbar ist. Ein Nach- teil sind die hohen Kosten für ein solches System.

In diesem Abschnitt wird ein Anbau im Schweller evaluiert. Dabei befindet sich ein rechteckiges Projektionsfeld vor der Fahrertür. Wie in den Anforderungen beschrieben, wird ein extrem großes FOV benötigt, um auf der kurzen Projektionsdistanz das gewünschte Projektionsfeld zu erzeugen. Aufgrund der Funktionsweise des DMD-Chips (typischerweise reflektive Ablenkung des Lichts um den Winkel  $24^\circ$ ) wird die Integration eines Fish-Eye-Objektivs als problematisch eingestuft. Bei diesem Objektiv müsste der Bildgeber extrem nah an der Optik positioniert werden oder sehr komplexe optische Systeme erstellt werden. Eine Integration der Lichtquelle wie auch des Absorbers zwischen Objektiv und Lichtquelle ist daher komplex. Alternativ kann zur Erzeugung des breiten FOV ein Freiformspiegel genutzt werden, welcher den Projektionskegel nach der Abbildungslinse aufweitet.



**Abbildung 7.8:** Mögliche Projektionsfelder um das Fahrzeug.

Für den Anbauort im Schweller ergeben sich sehr starke Restriktionen durch den Bauraum. Projektionssysteme größer als  $15 \text{ cm}^2$  sind

schwer zu integrieren. Jedoch ergibt sich die Möglichkeit, die Dimension entlang der Fahrzeugseite zu erhöhen. Ein System, welches in x und y begrenzt, jedoch in z eine größere Ausdehnung vorweist, kann somit unter Umständen implementiert werden. Das Projektionsfeld soll eine Ausdehnung von mindestens 50 x 50 cm<sup>2</sup> vorweisen.

### 7.2.1 AUSLEGUNG DES SYSTEMS

#### *Wahl des Bildgebers*

Um die Anforderungen an die Auflösung zu erfüllen, sind mehr als 166 x 166 Pixel notwendig. Typischerweise liegen die Kippwinkel für automotivzertifizierte DMD-Produkte im Bereich von  $\pm 12^\circ$  [72, 74]. Um einen größeren Lichtstrom durch die Projektionslinse auf die Straße projizieren zu können, wurde für den vorliegenden Prototypen jedoch der DLP 2010 mit einem Kippwinkel von  $\pm 17^\circ$  [96] gewählt (siehe **Tabelle 7.5**).

**Tabelle 7.5:** Überblick über die wichtigsten Daten des DLP2010.

Bezeichnung	Wert
Kippwinkel	$\pm 17^\circ$
Pixel	854 x 480
Pixelpitch	5,4 $\mu\text{m}$
Aktive Fläche	4,6 x 2,6 mm <sup>2</sup>

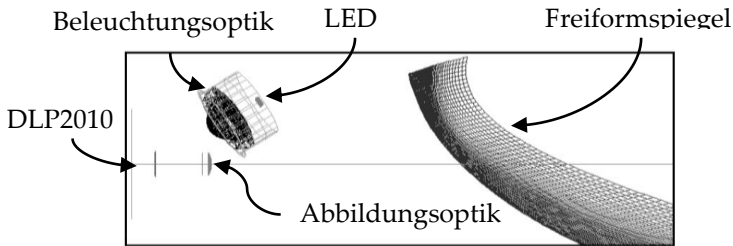
### *Wahl der LED und Beleuchtungsoptik*

Als Lichtquelle wurde für den Prototypen die OSRAM Oslon Compact CL LUW.CEUP.CE gewählt [62]. Diese automotivqualifizierte Lichtquelle kann bei einer Bestromung von 1,5 A ca. 400 lm zur Verfügung stellen.

Für die Beleuchtung des Bildgebers wurde eine refraktive Kollimationsoptik verwendet, die den Bildgeber direkt beleuchtet.

### *Wahl des optischen Systems*

Nach dem Bildgeber wird eine einfache Abbildungslinse integriert. Wie oben beschrieben, kann für die Realisierung eines extrem großen Öffnungswinkels beispielsweise ein Fischaugenobjektiv genutzt werden. Aufgrund der reflektiven Funktionsweise des Displays wird diese Implementierung jedoch nicht gewählt. Alternativ kann die Vergrößerung des Öffnungswinkels durch einen Freiformspiegel realisiert werden. Der weitere Strahlengang verläuft über die Abbildungsoptik über den Freiformspiegel auf die Straße. Der Freiformspiegel sollte in einem gewissen Abstand hinter der Projektionslinse positioniert werden. Das Konzept einschließlich Abbildungs- und Beleuchtungsoptik ist schematisch in **Abbildung 7.9** dargestellt.



**Abbildung 7.9:** Modell des Prototyps

Das Licht der LED wird über die Beleuchtungsoptik auf den Bildgeber gelenkt.

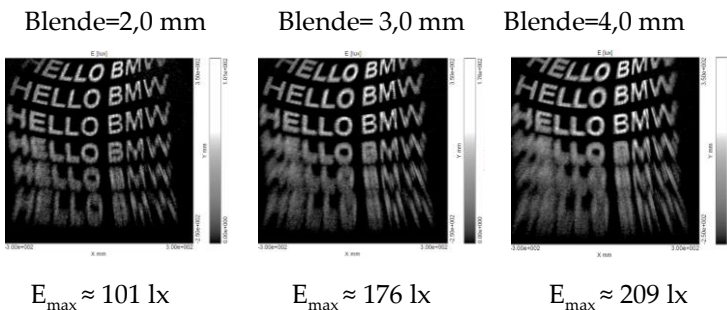
Um die ideale Distanz zwischen Bildgeber und optischem Element zu ermitteln, wurde der Abstand der Abbildungslinse in 0,1 mm-Schritten variiert und die Abbildungsqualität der unterschiedlichen Bilder miteinander verglichen. Eine Visualisierung der Projektion für unterschiedliche Distanzen des Bildgebers von der Abbildungslinse (Abstände von 0,3 mm) ist in **Abbildung 7.10** erfolgt.



**Abbildung 7.10:** Abbildungsqualität auf der Projektionsebene mit unterschiedlicher Distanz der Projektionsoptik zum Bildgeber. Die Abstandsvariation zwischen den einzelnen Bildern beträgt 0,3 mm.

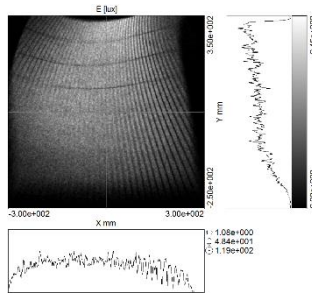
Für Bild 1, 4 und 5 ist eine verminderte Abbildungsgüte zu erkennen, welche insbesondere unscharfe Strukturen in den unteren Bildbereich aufweisen. Bild 2 und 3 weisen im oberen Bereich von Zeile 1 – 3 eine vergleichbare Abbildungsgüte auf. Ab Zeile 4 ist die Abbildungsgüte bei beiden Abständen vermindert, jedoch bei Bild 2 leicht besser, weshalb dieser Abstand für die weitere Betrachtung gewählt wurde.

Um die Abbildungsqualität weiter zu erhöhen, kann eine variable Blende genutzt werden. Diese Manipulation des optischen Systems bringt einen Effizienzverlust mit sich. In **Abbildung 7.11** ist der Einfluss unterschiedlicher Blendendurchmesser auf die maximale Beleuchtungsstärke dargestellt. Neben der Änderung der maximalen Beleuchtungsstärke lässt sich die Änderung der Abbildungsqualität für unterschiedliche Blenden visuell sehr gut darstellen. Die Graustufenskala neben den Bildern gibt die Beleuchtungsstärke wieder. Das Maximum der Beleuchtungsstärke ist unter dem jeweiligen Bild dargestellt.



**Abbildung 7.11:** Einfluss der Blende auf die Abbildungsqualität sowie auf die Beleuchtungsstärke.

Durch das Freiformelement wird der natürliche Helligkeitsabfall einer schrägen Projektion teilweise kompensiert. Es ist jedoch weiterhin ein Abfall in der Beleuchtungsstärke mit zunehmendem Abstand zur Projektionsoptik zu beobachten (vgl. **Abbildung 7.12**, Grafik neben der y-Achse).



**Abbildung 7.12:** Beleuchtungsstärke im horizontalen sowie vertikalen Schnitt durch eine Testgrafik (Blende = 4 mm).



## 7.2.2 VERMESSUNG DES PROTOTYPEN

Wie oben beschrieben, wurde für den Bildgeber der DLP2010 verwendet. Die Implementierung zusammen mit Projektionsoptik und Freiformspiegel ist in **Abbildung 7.13** zu sehen.



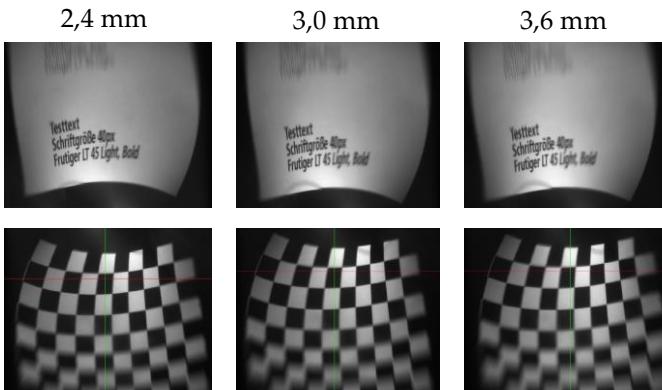
**Abbildung 7.13:** Draufsicht auf den Prototypen. Das Strahlenbündel tritt durch die Öffnung auf der Abbildung unten aus dem System aus.

Die Messungen wurden bei einer Anbauhöhe von 168 mm durchgeführt und sind somit leicht höher als die oben dargestellten Simulationen. Das Projektionsfeld hat einen Durchmesser von ca.  $0,6 \times 0,5 \text{ m}^2$ .

### *Abbildungsqualität*

Die Abbildungsqualität wurde mit der Hilfe von zwei Testbildern bewertet. Das erste Testbild enthielt den Text „Testtext, Schriftgröße 40 px, Frutiger LT 45 Light, Bold“ jeweils in dem unteren Bereich des

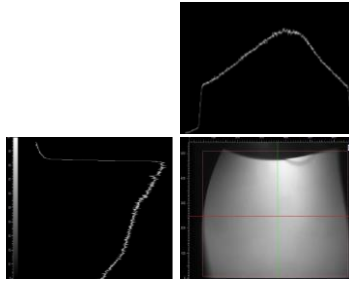
Projektionsfeldes (nah am Projektor) und im oberen Bereich des Projektionsfeldes (weiter entfernt vom Projektor). Um die Verzerrungen in die verschiedenen Richtungen für dieses System zu verdeutlichen, wurde als weiteres Testbild ein Schachmuster gewählt. Bei der Evaluation der Abbildungsqualität wurden ebenso verschiedene Blenden mit den Durchmessern 2,4 mm, 3,0 mm und 3,6 mm verwendet. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 7.14** dargestellt.



**Abbildung 7.14:** Abbildungsqualität für die unterschiedlichen Blenden mit den Durchmessern 2,4 mm, 3,0 mm und 3,6 mm

### *Beleuchtungsstärke*

Für die Ermittlung der Beleuchtungsstärke wurde die LED mit 1500 mA bestromt, wodurch sich ein Lichtstrom von 400 lm einstellt. Und ein weißes Testbild projiziert (siehe **Abbildung 7.15**).



**Abbildung 7.15:** Beleuchtungsstärke (für Blende = 3,0 mm) mit einem horizontalen Schnitt und einem vertikalen Schnitt.

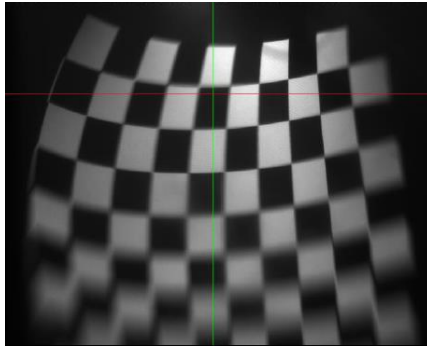
Die ermittelten Werte für die maximale und mittlere Beleuchtungsstärke sind in **Tabelle 7.6** gegeben.

**Tabelle 7.6:** Maximale ( $E_{\max}$ ) und durchschnittliche ( $E_{\text{mean}}$ ) Beleuchtungsstärke für unterschiedliche Blenden.

Blende	$E_{\max}$	$E_{\text{mean}}$
2,4 mm	58 lx	34 lx
3,0 mm	82 lx	44 lx
3,6 mm	95 lx	53 lx

### *Kontrast*

Der Kontrast der Projektion wird mittels eines Testmusters ermittelt. Dieses ist in **Abbildung 7.16** dargestellt.



**Abbildung 7.16:** Ermittlung des Kontrasts mithilfe des Schachmusters (hier im Beispiel ist die Blende mit 0,3 mm Durchmesser dargestellt).

In **Abbildung 7.16** zeigt die rote Linie den Schnitt für die Ermittlung des Kontrastes in der horizontalen, die grüne Linie den vertikalen Schnitt. Für  $K_{\min}$  und  $K_{\max}$  wurde das Minimum und das Maximum beider Schnitte herangezogen.

**Tabelle 7.7:** Maximaler ( $K_{\max}$ ) und minimaler ( $K_{\min}$ ) Kontrast für unterschiedliche Blenden.

Blende	$K_{\max}$	$K_{\min}$
2,4 mm	7,6	4,2
3,0 mm	8,4	5,3
3,6 mm	8,5	5,5

### 7.2.1 BEWERTUNG DES DMD-LED-PROJEKTIONSSYSTEMS

Die Anforderung an das Projektionssystem kann durch das vorliegende Konzept nicht erfüllt werden. Über den Ansatz des Freiformspiegels kann zwar der notwendige Öffnungswinkel der Projektion erreicht werden, jedoch ist die Abbildungsqualität über den gesamten Bereich nicht ausreichend. Ebenso ergeben sich Nachteile durch den großen Bauraum. Eine Integration in das Heck oder in den Raum der Nebelscheinwerfer ist denkbar, eine Integration in den Schweller jedoch schwierig. Die Anforderung an die Beleuchtungsstärke kann mit der Blende 3,6 mm teilweise erreicht werden. Jedoch liegt der Mittelwert bereits unterhalb der geforderten 65 lx. Eine größere Blende würde die Abbildungsqualität weiter mindern. Jegliche Systeme zeigen einen Kontrast im Bereich zwischen 4,2 und 8,5. Diese Werte sind somit für ein Szenario bei Nacht akzeptabel. Es gibt kaum Farbeffekte bei der Projektion. Die extremen Anforderungen können mit diesem System nicht erfüllt werden. Ebenso ist das System sehr sensitiv gegenüber kleinen Variationen in der Distanz zwischen Bildgeber und Abbildungslinse.

## 7.3 RGB-LASER LCOS

Folgend wird eine prototypische Umsetzung eines RGB-LCoS-Systems anhand der verschiedenen Kriterien evaluiert. Anhand dieses

Prototyps sollen ebenso Beleuchtungsstärken wie Kontraste ermittelt werden. Darüber hinaus kann der LCoS-Chip laut Datenblatt 9 Color Fields per Frame ermöglichen. Bei einer Bildwiederholrate von 60 Bildern pro Sekunde werden somit 540 Bilder pro Sekunde generiert. Die Auswirkungen auf die Projektion bei dieser Einstellung sollen ebenso untersucht werden.

### 7.3.1 AUFBAU DES SYSTEMS

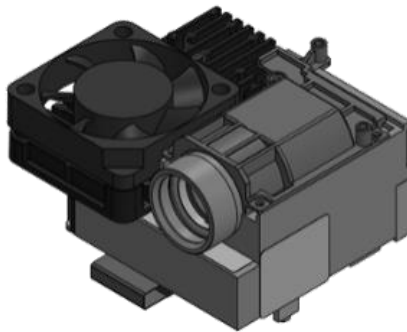
Das System besteht aus RGB-Laserdioden. Dabei liegt der optische Output der Laserdioden bei  $< 140$  mW für rot,  $< 135$  mW für grün und  $< 100$  mW für blau. Zusätzlich ist das System aus Kollimationsoptiken, Beamcombinern, Homogenisierer (multi lens array), einem Despeckler (vibrierendes reflektives Element), einem polarisierenden Strahlteiler, sowie einem LCoS-Chip (SYL2271 [97]) und Projektionsoptiken ausgestattet. Die Spezifikationen des LCoS-panels sind in **Tabelle 7.8** aufgelistet.

**Tabelle 7.8:** Überblick über die wichtigsten Daten des SYL2271.

Bezeichnung	Wert
Füllfaktor	93,8 %
Reflektivität	70 %
Auflösung	1280 x 720
Pixelpitch	6,4 $\mu\text{m}$
Aktive Fläche	8,192 x 4,608 mm <sup>2</sup>
Operating Temperature	-10°C – 70°C
Storage Temperature	-40°C – 80°C

Wie in Anhang B2 beschrieben, gibt es starke thermische Einschränkungen, so dass das System bei einer Weißlichtmischung durch RGB-Dioden zusätzlich aktiv gekühlt werden muss. Somit wird in dem System zusätzlich ein Lüfter integriert.

Die prototypische Umsetzung ist in **Abbildung 7.17** dargestellt.



**Abbildung 7.17:** Modell der Laser-LCoS-Projektors.

Der Bauraum des Systems beläuft sich auf etwa 87 cm<sup>3</sup>. Weitere Eigenschaften des Systems sind in **Tabelle 7.9** aufgelistet.

**Tabelle 7.9:** Überblick über die wichtigsten Eigenschaften des optischen Systems.

Bezeichnung	Wert
Öffnungswinkel	61°
Bauraum (inklusive Elektronik)	49,65 x 49 x 35,8 mm <sup>3</sup>
Laserklasse	1

### 7.3.2 VERMESSUNG DES PROTOTYPEN

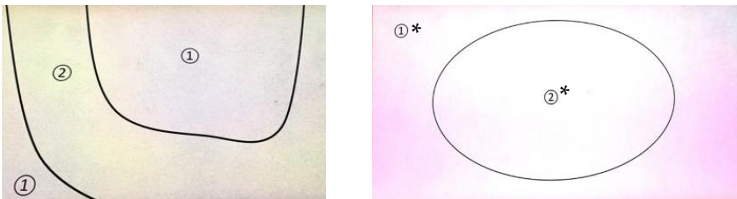
#### *Beleuchtungsstärke und Kontrast*

Analog zu dem Prototypen LCoS LED wird die Testgrafik aus **Abbildung 7.5** verwendet, um Beleuchtungsstärken und Kontrast zu ermitteln. In **Tabelle B 6** sind die gemessenen Werte für eine Color Field Rate von 240 Bildern pro Sekunde (60 Hz mit 4 Farbfeldern (rgbg)) dargestellt. Die durchschnittliche Beleuchtungsstärke bei einer Feldgröße von 76,1 x 43,2 cm<sup>2</sup> beträgt ca. 240 lx, was einem Gesamtlichtstrom von etwa 78 lm entspricht. Der berechnete Kontrast des LASER-LCoS-Systems beträgt durchschnittlich 33,16.

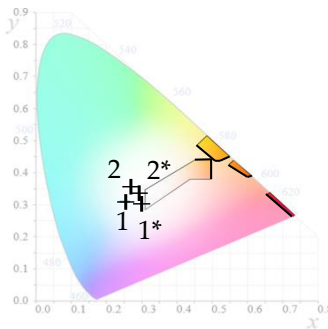


*Farbe der Projektion und Color-Breakup-Effekt*

Bereits beim Betrachten eines weißen Projektionsbildes wurden durch die Beobachter subjektiv unterschiedliche Farben wahrgenommen. Ebenso ergeben sich stark unterschiedliche Farbeindrücke bei der Wahl der verschiedenen Bildwiederholraten. In **Abbildung 7.18** ist eine Aufnahme der Projektion mit einem Weißbild. Die Farbkordinaten der in **Abbildung 7.18** gekennzeichneten Felder sind in **Abbildung 7.19** dargestellt.



**Abbildung 7.18:** Weißbildprojektion, links: mit einem LCoS (540 hz), rechts: mit einem LCoS (240 hz). Zusätzlich sind Bereiche unterschiedlicher Färbungen eingezeichnet.



**Abbildung 7.19:** Farbkoordinaten der unterschiedlichen Systeme. In der Standardkonfiguration trifft kein System in den ECE-Farbraum.

### 7.3.3 BEWERTUNG DES LCOS-RGB-LASERSYSTEMS

Das LCoS-RGB-Lasersystem zeigt sowohl extreme Vor- als auch Nachteile. Die Vorteile gegenüber LED-Projektionssystemen ergeben sich für die Abbildungsqualität und die Beleuchtungsstärke. Gegenüber Laserscannenden Systemen weist dieses Projektionssystem eine hohe Augensicherheit vor. Die Auflösung ist durch  $1280 \times 720$  Pixel für die betrachteten Projektionsfeldgrößen hinreichend. Durch die geringe Étendue des Lasers, kann der Bildgeber durch sehr gut kollimiertes Licht beleuchtet werden. Somit weist die Projektion eine hohe Tiefenschärfe vor. Schräge Projektionen können somit sehr gut ermöglicht werden. Ebenso werden mehr als 70 lm Lichtstrom zur Verfügung gestellt. Somit kann jegliche Designprojektion mit diesem System ermöglicht werden. Der ermittelte Kontrast ist besser als der

des LCoS-LED-Prototypen liegt und auch über den Mindestanforderungen, die sich aus **Tabelle 3.10** ergeben. Ebenso ist es von großem Vorteil, dass es sich um ein System der Klasse 1 handelt und somit in dieser Arbeit als augensicher eingestuft wird.

Nachteilig ist jedoch, dass eine Kühlung der Laserdioden notwendig ist. Dadurch verringert sich die Möglichkeit der Integrationsorte. Bei hohen Umgebungstemperaturen ist unter Umständen eine Luftkühlung ebenso nicht mehr ausreichend. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die begrenzte Schaltgeschwindigkeit der LC-Moleküle. Bei einer Bildwiederholrate von 240 cf/s sind die Regenbogeneffekte stark sichtbar und teilweise störend. Bei höheren Schaltgeschwindigkeiten kommt das vorliegende Modul an seine Grenzen und es ergeben sich unerwünschte Farbeffekte in der Projektion. Das Potential dieser Technologie ist somit sehr hoch, es gibt jedoch bestimmte Grenzen, die eine Implementierung in ein Fahrzeug aktuell nicht ermöglichen.

## Kapitel 8

# FAZIT UND AUSBLICK

### 8.1 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten von dynamischen Projektionen im Bereich um das Fahrzeug analysiert. Hierfür wurden zunächst die Anforderungen gesammelt und definiert.

In Kapitel 4 wurden die Einschränkungen, die sich durch physiologische Rahmenbedingungen ergeben, analysiert. Im ersten Teil des Kapitels wurde dabei näher auf die Augensicherheit eingegangen. Systeme, welche einen Flächenmodulator (DMD, LCD, LCoS) als Bildgeber nutzen, ermöglichen hohe Beleuchtungsstärken und können gleichzeitig als augensicher eingestuft werden. Diese Systeme sind in der Lage, Flächen wie auch Silhouetten auszuleuchten. Laserscanner sind in diesem Fall weniger variabel. Eine Flächenausleuchtung mit hohen Beleuchtungsstärken ist zwar möglich, aber die

Augensicherheit kann nicht mehr gewährleistet werden. Eine Ausleuchtung kurzer Trajektorien mit relativ hohen Beleuchtungsstärken ist hier möglich.

Im zweiten Teil des Kapitels wurde näher auf die Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes eingegangen. Zusammen mit der prototypischen Auswertung aus Kapitel 7 ergab sich, dass insbesondere Flüssigkristallbildgeber mit einer sequentiellen RGB- Beleuchtung aktuell (aufgrund der starken Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes) weniger geeignet sind. Dieser Effekt ist auch bei typischen Grenzwerten von DMD-Systemen sichtbar, wird jedoch als weniger störend eingestuft.

Im fünften Kapitel wurde der Einfluss der Straße als Projektionsfläche näher untersucht. Dabei wurde ein polarisationsabhängiges Streuverhalten gefunden. P-polarisiertes Licht wird auch bei Straßen anders als S-polarisiertes Licht gestreut. Somit muss bei einer Auslegung optischer Systeme, welche polarisiertes Licht nutzen, auf die Parallelität der Polarisationsrichtungen geachtet werden. Wenn dies nicht geschieht, können unerwünschte Effekte auftreten. Bei RGB-Systemen kann bei nichtparalleler Ausrichtung der unterschiedlichen Komponenten eine Änderung der Farbe des projizierten Bildes aus verschiedenen Raumrichtungen entstehen.

In Kapitel 6 wurde mit Hilfe der erarbeiteten Anforderungen sowie den ermittelten Einschränkungen eine Auswahl an Systemen getroffen, die genauer evaluiert werden sollten. Neben dem DMD-System

kann ein LCD oder LCoS-System für Designprojektionen mit Weißlicht (kein Color-break-up-Effekt) genutzt werden. Somit wurde ein LCoS-System prototypisch aufgebaut und hinsichtlich verschiedener Kriterien genauer untersucht. Ein Großteil der Anforderungen kann durch ein solches System erfüllt werden, so dass dieses System für eine Designprojektion im Auto seine Anwendung finden kann.

Da ebenso das DMD-System die Anwendungen erfüllen kann, wurde auch dieses System evaluiert. Ein Projektionssystem mit DMD-Chip ist den LC-Bildgebern bei unpolarisierter Beleuchtung überlegen. Daher wurde dieses System für die komplexe Integration im Schweller herangezogen. Durch die Nutzung eines Freiformspiegels konnte ein großes „Field of View“ realisiert werden. Der benötigte Bauraum wie auch die Abbildungsqualität der gewählten Auslegung wurden jedoch als unzureichend bewertet.

Viele Vorteile bringt ein RGB-Lasersystem. Dieses wurde mit einem LCoS-Chip kombiniert. Der Prototyp zeigt deutlich, dass viele Anforderungen durch eine solche Konstruktion erfüllt werden. Die vorher ermittelten Grenzen hinsichtlich notwendiger Kühlung und Augensicherheit sind auch in diesem System vorhanden.

Es gibt einen gewissen Anforderungsbereich, der durch dynamische Projektionen abgedeckt werden kann. Wenn der notwendige Bauraum vorhanden ist, sind DMD-Systeme in der Lage, die Anforderungen zu erfüllen. LCoS und LCD-Systeme können aktuell jedoch für kleinere Projektionsfelder nicht ausgeschlossen werden. Laser-

systeme (bei RGB-Nutzung) sind aufgrund ihrer thermischen Rahmenbedingungen nur bedingt (zum Beispiel im Scheinwerfer) einsetzbar. Eine weiße Projektion, die bei Tag sichtbar ist, ist aktuell nicht realisierbar.

## 8.2 AUSBLICK

Der Markt für Projektionen ist in den letzten Jahren gewachsen und wird auch in Zukunft weiterhin florieren. Neben den Designprojektionen sind erste Sicherheitsprojektionen auf der Straße prototypisch untersucht. Folgend wird die weitere Entwicklung in eine kurzfristige und langfristige Perspektive aufgeteilt.

### *Kurzfristig*

Die Regulationen erlauben ausschließlich weiße Projektionen in der Umgebung des Fahrzeugumfeldes. Hochauflösende, dynamische Projektionen können durch ein DMD-System ermöglicht werden. Als Alternativen können LCoS und LCD-Systeme entwickelt werden, die ähnliche Funktionen generieren.

### *Langfristig*

Eine Weiterentwicklung der thermischen Stabilität von roten Laserdioden kann den Einsatz von Lasern in Kombination mit einem Bildgeber oder Scanner ermöglichen. Bei Anpassung der Regulationen können somit auch nur rote, grüne oder blaue Projektionen ermöglicht werden.



Ebenso sollte die  $\mu$ LED-Technologie weiterverfolgt werden. Die ersten Entwicklungen mit  $32 \times 32$  Pixeln und einem Pixeldurchmesser von  $125 \mu\text{m}$  erlauben noch nicht die Dynamik, die für dynamische Projektionen notwendig sind. Aufgrund der lambertschen Abstrahlcharakteristik des Bildgebers sind ebenso komplexe Linsensysteme notwendig, welche eine hohe Gesamteffizienz ermöglichen. Bei einer Weiterentwicklung zu kleineren Pixelpitches mit einer größeren Pixelanzahl können  $\mu$ LED-Systeme eine Vielzahl von Projektionssystemen realisiert werden.

### III ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1.1:</b>	Visualisierung verschiedener Ideen von Projektionen in das Umfeld des Fahrzeuges. .....	8
<b>Abbildung 1.2:</b>	Inhalt der Arbeit (für eine bessere Lesbarkeit wurden die Titel der Kapitel gekürzt).....	10
<b>Abbildung 2.1:</b>	Anmeldungen pro Jahr, welche unter der Patentklassifikation B60Q1 sowie unter den Schlagworten „LCD“, „LCoS“, „DMD“, „Micromirror“ und „Projection“ zu finden sind (für 2017 waren zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht alle Anmeldungen verfügbar).....	13
<b>Abbildung 2.2:</b>	Projektion aus dem Schweller. ....	19
<b>Abbildung 2.3:</b>	Schematischer Aufbau eines Projektionsmoduls, welches die MLA-Technologie verwendet. ....	20
<b>Abbildung 3.1:</b>	Beobachter und Projektionsfeld. ....	27
<b>Abbildung 3.2:</b>	Abstand des Beobachters zu einem beliebigen Punkt z innerhalb einer projizierten Fläche. ....	30
<b>Abbildung 3.3:</b>	Beispielhafte Einbauorte von Projektionssystemen und deren Lichtkegel.....	32

<b>Abbildung 3.4:</b>	Draufsicht auf ein Projektionsfeld mit der Kantenlänge von jeweils 0,5 m. ....	33
<b>Abbildung 3.5:</b>	Seitenansicht auf das Projektionsfeld mit der Kantenlänge von jeweils 0,5 m.....	33
<b>Abbildung 3.6:</b>	Bauraum eines Projektionsmoduls, welches in den Seitenspiegel integriert werden kann. ....	39
<b>Abbildung 3.7:</b>	Bauraum für das Lichtteppichmodul.....	40
<b>Abbildung 3.8:</b>	CIE-Normfarbtafel (Quelle: [47]). Nach ECE-Regelung zugelassene Farbräume sind hervorgehoben, nicht zugelassene Räume sind aufgehellt.....	42
<b>Abbildung 3.9:</b>	Anforderungen an eine Designprojektion. Links: bei Projektion aus dem Außenspiegel, rechts: bei Projektion aus dem Schweller. ....	50
<b>Abbildung 3.10:</b>	Anforderungen an eine Sicherheitsprojektion. Links: bei Projektion aus dem Außenspiegel, rechts: bei Projektion aus dem Schweller. ....	51
<b>Abbildung 3.11:</b>	Anforderungen an eine Interaktionsprojektion. Links: bei Projektion aus dem Außenspiegel, rechts: bei Projektion aus dem Schweller.....	52
<b>Abbildung 3.12:</b>	Anforderungen an eine HAF-Projektion aus dem Scheinwerfer. ....	53
<b>Abbildung 4.1:</b>	Vergleich der Arbeitsweise „Vektorscan“ und „resonant- quasistatischer Scan“. ....	56

**Abbildung 4.2:** Unterschiedliche Darstellungen eines Pfeils. Links: Silhouette, rechts: mit verschiedenen Grautönen gefülltes Projektionsfeld. .... 57

**Abbildung 4.3:** Temporaler Verlauf der Schreibgeschwindigkeit (auf der Projektionsfläche) bei einer Linie. .... 61

**Abbildung 4.4:** Links: Schematische Darstellung der Scantrajektorie beim Überstreichen über das Auge. Rechts: schematische Darstellung der Projektionsumgebung. .... 62

**Abbildung 4.5:** Länge der Scantrajektorie ( $l_{proj}$ ) für einen Pfeil der 100 cm lang und 75 cm breit ist. .... 63

**Abbildung 4.6:** Draufsicht auf eine längliche Testprojektion. .... 64

**Abbildung 4.7:** Maximale Beleuchtungsstärke eines scannenden Systems für Laserklasse 2. .... 68

**Abbildung 4.8:** Auge befindet sich in der Mitte des Projektionskegels (P1) und am Rand (P2). .... 70

**Abbildung 4.9:** Variation der Projektionshöhe bei sonst gleichbleibenden Parametern bei einer schrägen Projektion. .... 71

**Abbildung 4.10:** Maße und Bezeichnungen der Winkel des Projektionskegels bei schräger Projektion sowie die angenommene Position des Auges. .... 72

**Abbildung 4.11:** Draufsicht auf eine längliche Testprojektion. .... 72

<b>Abbildung 4.12:</b>	Maximale Beleuchtungsstärken bei einer schrägen Projektion für unterschiedliche Anbauhöhen. Bei einer Projektionslänge $l_{\text{Proj}} = 1 \text{ m}$ ( $s = 2,2$ ) und $l_{\text{Proj}} = 22 \text{ m}$ ( $s = 22$ ). .....74
<b>Abbildung 4.13:</b>	Maße des gewählten Projektionsinhaltes. ....78
<b>Abbildung 5.1:</b>	Reflexionskoeffizient für s- und p-polarisiertes Licht. Der Brechungsindex des ersten Mediums wird mit $n_1=1$ beschrieben, der des zweiten mit $n_2=1,83$ . .....84
<b>Abbildung 5.2:</b>	Schematische Darstellung von einfallendem Licht (schwarz) auf eine raue Oberfläche. Für die gleiche Einfallsrichtung ergeben sich hier drei unterschiedliche Streurichtungen für das reflektierte Licht (grau und grau gestrichelt nach der zweiten Reflexion). .....85
<b>Abbildung 5.3:</b>	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. ....86
<b>Abbildung 5.4:</b>	Leuchtdichte in $\text{cd/m}^2$ für unterschiedliche Winkel für s-polarisiertes (Kreuz) und p-polarisiertes (Raute und Strich) Licht. ....87
<b>Abbildung 5.5:</b>	Farbwahrnehmung durch einen Betrachter einer Projektion (kleines Rechteck neben dem Fahrzeug) aus unterschiedlichen Beobachtungswinkeln (Position A und Position B). Bei einer Zusammensetzung des weißen Lichts aus zwei p-polarisierten Komponenten (rot und blau) und einer s-polarisierten Komponente (grün) kann aus

	der Position B ein grüner Bildeindruck entstehen, während in Position A ein weißer Bildeindruck entsteht.....	89
<b>Abbildung 5.6:</b>	(x, y) - Koordinaten für unterschiedliche Zusammensetzungen der Polarisation des emittierten Lichtstromes.....	91
<b>Abbildung 6.1:</b>	Unterschiedliche Lichtquellen wie Bildgeber. Aus der Kombination der unterschiedlichen Komponenten bestehen die Systeme. ....	93
<b>Abbildung 6.2:</b>	Paraboloider Reflektor zur Kollimation des Lichtes. ....	96
<b>Abbildung 6.3:</b>	Refraktive Kollimation, dargestellt durch eine einzelne Linse. ....	97
<b>Abbildung 6.4:</b>	Zusammenhang zwischen Divergenz nach der Kollimation und Größe des Systems. ....	98
<b>Abbildung 6.5:</b>	Schematische Darstellung eines transmissiven LCD-Systems. ....	103
<b>Abbildung 6.6:</b>	Schematische Darstellung der Relationen im verwendeten Projektionssystem.....	105
<b>Abbildung 6.7:</b>	Überblick über die unterschiedlichen Beiträge zur Gesamteffizienz eines LCD-Systems. ....	107
<b>Abbildung 6.8:</b>	Effizienz $\eta^*_{\text{Proj}}$ , die sich bei gegebenen Abhängigkeiten der Geometrien und einer 1 x 1 mm <sup>2</sup> LED für unterschiedliche Systemlängen L <sub>LCD</sub> ergibt (Fresnelverluste werden in diesem Fall ignoriert, jedoch für die Gesamteffizienz beachtet).....	111

<b>Abbildung 6.9:</b>	Effizienz des LCD- Gesamtsystems bei einer LED mit einer Größe von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . ....	111
<b>Abbildung 6.10:</b>	Schematischer Aufbau eines Projektionssystems mit LCoS und PBS. ....	112
<b>Abbildung 6.11:</b>	Effizienz $\eta_{\text{LCoS}}$ in Abhängigkeit der Systemlänge $L_{\text{LCoS}}$ bei einer LED-Größe von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . ....	115
<b>Abbildung 6.12:</b>	Schematischer Aufbau eines Projektionssystems mit DMD-Chip. ....	117
<b>Abbildung 6.13:</b>	Schematischer Aufbau eines Projektionssystems mit DMD-Chip und Spiegel. ....	117
<b>Abbildung 6.14:</b>	Schematischer Aufbau eines Projektionssystems mit DMD-Chip und TIR-Prisma. ....	118
<b>Abbildung 6.15:</b>	Effizienz eines DMD-Systems mit einer Projektionsoptik mit $F/\#=2$ und einer LED mit einer Kantenlänge von einem Millimeter. ....	119
<b>Abbildung 6.16:</b>	Vergleich des möglichen Lichtstromoutputs der drei untersuchten Systeme: LCD, LCoS und DMD. Die LED weist eine Leuchtdichte von $90 \text{ cd/mm}^2$ und eine Seitenlänge von jeweils einem Millimeter. ....	121
<b>Abbildung 6.17:</b>	Schematische Darstellung eines Projektionssystems mit $\mu\text{LED}$ - Technologie. ....	122
<b>Abbildung 6.18:</b>	Effizienz eines $\mu\text{LED}$ Projektionssystems in Abhängigkeit zur Systemgröße, der Chip	

	weist dabei eine Kantenlänge von 13,2 mm vor.....	123
<b>Abbildung 6.19:</b>	Schematische Darstellung unterschiedlicher Projektionssysteme. ....	125
<b>Abbildung 6.20:</b>	Vereinfachte, schematische Darstellung eines Laserscanners mit Mikrospiegel.....	127
<b>Abbildung 6.21:</b>	Schematische Darstellung eines Systems mit phosphorkonvertiertem Laserlicht. ....	128
<b>Abbildung 6.22:</b>	Maximale Effizienzen der unterschiedlichen Systeme bei einer Projektion eines weißen Feldes. Die Randbedingungen sind dem Text zu entnehmen.....	130
<b>Abbildung 6.23:</b>	Schematische Darstellung des Volumens der unterschiedlichen Komponenten in Abhängigkeit von der Effizienz. ....	136
<b>Abbildung 6.24:</b>	Optimiertes Volumen und Effizienz der verschiedenen Systeme bei unterschiedlichem Lichtstromoutput. Dabei steht das Symbol „◆“ für DMD, „■“ für LCD, „▲“ für ein LCoS-System und „●“ für ein $\mu$ LED-System.....	137
<b>Abbildung 6.25:</b>	Vergleich des Temperaturverlaufs für einen Kühlkörper mit freier Konvektion ( $V_{\text{sink}} = 42 \text{ cm}^3$ ) zu unterschiedlichen Konzepten ohne Konvektion; die Erläuterungen sind im Text zu finden.....	139



<b>Abbildung 6.26:</b>	Auswirkung auf die Abbildung durch die minimale Pixelgröße und Abbildungsfehler durch die Optik.....	144
<b>Abbildung 6.27:</b>	$\theta_{\text{diff}}$ für Licht der Wellenlänge 650 nm und variabler Apertur D.....	145
<b>Abbildung 6.28:</b>	Notwendige Kantenlänge des Displays in Abhängigkeit zum Pixelpitch zur Projektion von 300 x 300 Pixel.....	149
<b>Abbildung 6.29:</b>	Notwendige Kantenlänge des Displays in Abhängigkeit von der Apertur und Brennweite. Anzahl der Pixel = 166 x 166, Lichtstromoutput des Systems = 15 lm, Leuchtdichte des Phosphors = 2000 cd/mm <sup>2</sup> . .....	151
<b>Abbildung 6.30:</b>	Schematische Darstellung eines einfachen Abbildungssystems. ....	153
<b>Abbildung 6.31:</b>	Schematische Darstellung einer Laserdiode mit einer Kollimationsoptik. ....	156
<b>Abbildung 6.32:</b>	Skizzierung der gewählten Variablen. Die Höhe des Projektionssystems wird durch h beschrieben, der Abstand zu P in „y-Richtung“ durch a und in „x-Richtung“ durch b. ....	157
<b>Abbildung 6.33:</b>	Grafische Darstellung der Ausdehnung eines Pixels auf der Straße mit den in <b>Tabelle 6.16</b> gegebenen Variablen. $f_1=4,5$ mm, $s_1=4,5045$ mm, $f_2=45$ mm, $s_2=45,045$ mm. Links: Pixelgröße für Projektionen in der Nähe des Schwellers ( $a/b/h=0,5\text{ m}/0\text{ m}/0,2$	

	m). Rechts: Pixelgröße für Projektionen in der Nähe des Schwellers ( $a/ b/ h = 0,5 \text{ m}/ 4 \text{ m}/ 0,2 \text{ m}$ ).....	160
<b>Abbildung 6.34:</b>	Lage der Strahltaile für unterschiedliche Werte von $s/f$ . Die Rayleighlänge beträgt in diesem Beispiel 5 mm, die Brennweite $f = 4 \text{ cm}$ .....	161
<b>Abbildung 6.35:</b>	Vergleich der Systeme „scannendes“ und „abbildendes System“ .....	162
<b>Abbildung 6.36:</b>	Vergleich der Anforderungen sowie der Bewertung des LCoS-Systems für eine <i>Designprojektion aus dem Außenspiegel</i> . .....	167
<b>Abbildung 6.37:</b>	Vergleich der Anforderungen sowie der Bewertung des $\mu$ LED-Systems für eine <i>Sicherheitsprojektion aus dem Schweller</i> . .....	168
<b>Abbildung 6.38:</b>	Entscheidungsdiagramm für die Wahl der Projektionssysteme.....	169
<b>Abbildung 7.1:</b>	2D-Ansicht des optischen Systems inklusive PBS sowie LCoS-Bildgeber.....	176
<b>Abbildung 7.2:</b>	Vergleich des RMS-Spotradius mit unterschiedlichen Wellenlängen (486 nm, 587 nm, 656 nm).....	176
<b>Abbildung 7.3:</b>	CAD-Modell des Prototyps.....	177
<b>Abbildung 7.4:</b>	Bild des Prototyps, zum Größenvergleich ist eine Euromünze auf den Projektor gestellt. ....	178
<b>Abbildung 7.5:</b>	Testmuster, um Beleuchtungsstärken und ortsabhängige Kontraste zu vermessen. ....	179

<b>Abbildung 7.6:</b>	Vergleich der Projektion mit den unterschiedlichen Strahlteilern. Links: der dielektrische Strahlteiler Polarisator, rechts: der Wiregrid Polarisator. ....	179
<b>Abbildung 7.7:</b>	Farbkoordinaten für das dielektrische System (DC) und dem Wiregrid (WG) im weißen Bereich (Index $w$ ) bzw. dem schwarzen Bereich (Index $s$ ) der Projektion. ....	182
<b>Abbildung 7.8:</b>	Mögliche Projektionsfelder um das Fahrzeug. ....	185
<b>Abbildung 7.9:</b>	Modell des Prototyps .....	188
<b>Abbildung 7.10:</b>	Abbildungsqualität auf der Projektionsebene mit unterschiedlicher Distanz der Projektionsoptik zum Bildgeber. Die Abstandsvariation zwischen den einzelnen Bildern beträgt 0,3 mm. ....	188
<b>Abbildung 7.11:</b>	Einfluss der Blende auf die Abbildungsqualität sowie auf die Beleuchtungsstärke. ....	189
<b>Abbildung 7.12:</b>	Beleuchtungsstärke im horizontalen sowie vertikalen Schnitt durch eine Testgrafik (Blende = 4 mm). ....	190
<b>Abbildung 7.13:</b>	Draufsicht auf den Prototypen. Das Strahlenbündel tritt durch die Öffnung auf der Abbildung unten aus dem System aus. ....	191
<b>Abbildung 7.14:</b>	Abbildungsqualität für die unterschiedlichen Blenden mit den Durchmessern 2,4 mm, 3,0 mm und 3,6 mm .....	192

<b>Abbildung 7.15:</b>	Beleuchtungsstärke (für Blende = 3,0 mm) .....	193
<b>Abbildung 7.16:</b>	Ermittlung des Kontrasts mithilfe des Schachmusters (hier im Beispiel ist die Blende mit 0,3 mm Durchmesser dargestellt).....	194
<b>Abbildung 7.17:</b>	Modell der Laser-LCoS-Projektors.....	197
<b>Abbildung 7.18:</b>	Weißbildprojektion, links: mit einem LCoS (540 hz), rechts: mit einem LCoS (240 hz). Zusätzlich sind die Bereiche unterschiedlicher Farbe eingezeichnet. ....	199
<b>Abbildung 7.19:</b>	Farbkoordinaten der unterschiedlichen Systeme. In der Standardkonfiguration trifft kein System in den ECE-Farbraum.....	200

## IV TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1:	Benötigte Durchmesser für eine Projektion. Die Werte sind als grober Minstdurchmesser zu verstehen. ....	29
Tabelle 3.2:	Benötigte Auflösung für eine Projektion. ....	31
Tabelle 3.3:	Klassifikation der unterschiedlichen Auflösungsanforderungen .....	34
Tabelle 3.4:	Bewertungsskala für das Auflösungsvermögen von Projektionssystemen.....	35
Tabelle 3.5:	Darstellung typischer Beleuchtungsstärken für unterschiedliche Situationen [43, 44] .....	36
Tabelle 3.6:	Benötigte Beleuchtungsstärken und Lichtströme nach Anwendungsszenario.....	38
Tabelle 3.7:	Bewertungsskala für die notwendigen Beleuchtungsstärken von Projektionssystemen mit gegebenen Projektionsfeldern (der Prozentwert gibt die Anzahl der Personen an, die in den Teststudien die Projektion korrekt erkannt haben).....	38
Tabelle 3.8:	Die unterschiedlichen Bauraumanforderungen für die Integration von Projektionssystemen in ein Fahrzeug.....	41
Tabelle 3.9:	Bewertungsskala zur Klassifizierung von Bauräumen. ....	42

Tabelle 3.10:	Minimale Kontrastanforderung nach DIN 15008:20009 [54] in Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtungsstärke. ....	45
Tabelle 3.11:	Auswirkung der Reduktion von Graustufen auf Bilder mit hohem Kontrast zum Nachbarfeld (oben) und auf Bilder mit niedrigem Kontrast zum Nachbarfeld (unten).....	45
Tabelle 3.12:	Bewertungsskala für die Augensicherheit (AS) von Projektionssystemen.....	47
Tabelle 3.13:	Bewertungsskala für die thermische Verfügbarkeit (TV) von Projektionssystemen. ....	48
Tabelle 4.1:	Grenzwerte für eine Punktdarstellung (Kreis mit Durchmesser = 3 mm) für unterschiedliche Wellenlängen bei Laserklasse 1. ....	59
Tabelle 4.2:	Grenzwerte für eine Punktdarstellung für unterschiedliche Wellenlängen bei Laserklasse 2. ....	59
Tabelle 4.3:	Vergleich der Arbeitsweise der unterschiedlichen Projektoren.....	79
Tabelle 4.4:	Bewertung der Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes bei einer Colorframerate von 240 Hz.....	80
Tabelle 4.5:	Bewertung der Wahrnehmbarkeit des Regenbogeneffektes bei einer Colorframerate von 720 Hz.....	80

Tabelle 4.6:	Zusammenfassung der Ergebnisse, wobei ✓ bedeutet, dass das System den Anforderungen entspricht, ✱ weist darauf hin, dass das System nicht den Anforderungen genügt und 0 weist darauf hin, dass das System für gewisse Umgebungsbeleuchtungsstärken $E_{amb}$ die Anforderungen erfüllen kann, jedoch nicht für alle $E_{amb}$ . .....	82
Tabelle 5.1:	Kennzeichnung der Systeme, welche polarisiertes Licht emittieren. ....	84
Tabelle 5.2:	Anteil der unterschiedlichen Wellenlängen um den Punkt $x= y= 0,33$ zu erzeugen. Die nicht aufgeführten Komponenten sind p-polarisiert. ....	90
Tabelle 6.1:	Überblick über die notwendigen optischen Komponenten der verschiedenen Systeme. ....	94
Tabelle 6.2:	Vergleich der notwendigen Kollimationslänge unterschiedlicher Systeme. ....	100
Tabelle 6.3:	Überblick über die unterschiedlichen Polarisatoren für LCD-Projektoren (Trägerplatte).....	101
Tabelle 6.4:	Effizienzen (für parallel zur optischen Achse einfallendes Licht) und mögliche Einfallswinkel der unterschiedlichen Polarisatoren für LCoS-Projektoren (Strahlteilerwürfel). ....	102

Tabelle 6.5:	Überblick über die Effizienz eines LCD-Systems. ....	109
Tabelle 6.6:	Überblick über die Beiträge zur Gesamteffizienz eines LCoS-Systems. ....	113
Tabelle 6.7:	Überblick über die Effizienz eines DMD-Systems [70] ohne systemgrößenabhängige Variablen. ....	116
Tabelle 6.8:	Wichtige Parameter der für den Automobilsektor qualifizierten Chips (*: Input Resolution; gibt nicht die Anzahl der Spiegel wieder). ....	120
Tabelle 6.9:	Maximaltemperatur der unterschiedlichen Komponenten eines Systems. ....	134
Tabelle 6.10:	Volumen ( $V_{\text{sink}}$ ) der notwendigen Kühlkörper bei unterschiedlichen Lichtstromanforderungen ( $\phi_{\text{out}}$ ).....	141
Tabelle 6.11:	Links: schematische Darstellung der minimal auflösbaren Spotgröße einer Projektionsoptik. Rechts: Limitierung der Auflösung durch den Bildgeber, mit einem Pixel als kleinste Struktur.....	143
Tabelle 6.12:	Mindestgröße der Apertur in Abhängigkeit des maximal zulässigen beugungsinduzierten Fehlers. ....	146
Tabelle 6.13:	Überblick über die Pixelgröße unterschiedlicher auf dem Markt verfügbarer Systeme [4, 80, 85 bis 87].....	147
Tabelle 6.14:	DMD, LCoS, LCD und $\mu$ LED: Überblick über die notwendigen Gegenstandsweiten,	



	um die Anforderungen an die Pixelgröße auf der Straße zu erfüllen. Es wurde jeweils ein aberrationsfreies System mit einer F-Zahl von zwei angenommen.....	154
Tabelle 6.15:	Phosphorkonvertierter Laser: Überblick über die notwendige Gegenstandsweite, um die Anforderungen an die Pixelgröße auf der Straße zu erfüllen. Es wurde jeweils ein aberrationsfreies System mit einer F-Zahl von zwei angenommen.....	155
Tabelle 6.16:	Überblick über die verschiedenen Variablen .....	159
Tabelle 6.17:	Optimierte Pixelgröße $s_{min}^*$ des Lasers für unterschiedliche Einbauorte, dabei wurde $f_2 = 45 \text{ mm}$ und $s_2 = 45,045 \text{ mm}$ genutzt.....	161
Tabelle 6.18:	Visuelle Zusammenfassung der Bewertung der unterschiedlichen Projektionssysteme hinsichtlich der verschiedenen Anforderungen. Bewertung durch Entscheidungsdiagramm in Abbildung 6.38. *steht dabei für ein realisierbares (grün) Lasersystem (Bildgeber + RGB-Laser), ** ein Lasersystem (Bildgeber + RGB-Laser), welches mit leichten Einschränkungen umgesetzt werden kann (gelb).....	170
Tabelle 7.1:	Überblick über die wichtigsten Daten des Bildgebers HED 2220 von Holoeye. ....	173

Tabelle 7.2:	Darstellung der Systemeffizienz für unterschiedliche Beleuchtungskonzepte und Homogenität (lineare Skalierung der Achsen).....	174
Tabelle 7.3:	Lichtstrom und Kontrast unterschiedlicher Projektionssysteme (emittierter Lichtstrom der LED = 308 lm).....	180
Tabelle 7.4:	Lichtstrom und Kontrast unterschiedlicher Projektionssysteme.....	181
Tabelle 7.5:	Überblick über die wichtigsten Daten des DLP2010.....	186
Tabelle 7.6:	Maximale ( $E_{\max}$ ) und durchschnittliche ( $E_{\text{mean}}$ ) Beleuchtungsstärke für unterschiedliche Blenden. ....	193
Tabelle 7.7:	Maximaler ( $K_{\max}$ ) und minimaler ( $K_{\min}$ ) Kontrast für unterschiedliche Blenden.....	194
Tabelle 7.8:	Überblick über die wichtigsten Daten des SYL2271. ....	197
Tabelle 7.9:	Überblick über die wichtigsten Eigenschaften des optischen Systems.....	198
Tabelle B 1:	Lineare Extrapolation der Diffraktionseffizienz für eine Optik mit $F/\#=2$ . ....	244
Tabelle B 2:	Auswahl an unterschiedlichen Anforderungen an die Projektionssysteme. ....	249
Tabelle B 3:	Aus FOV und erlaubter Fehler im Winkel, aus den gegebenen Anforderungen.....	251

---

TABELLENVERZEICHNIS

---

Tabelle B 4:	Genutzte Zahlenwerte für die unterschiedlichen Anbau- und Projektionsorte. ....	252
Tabelle B 5:	Gemessene Beleuchtungsstärken für einen Projektionsabstand von einem Meter für die unterschiedlichen Systeme (LCoS mit dielektrischem Beamsplitter und LCoS mit Wiregrid Beamsplitter). ....	272
Tabelle B 6:	Gemessene Beleuchtungsstärken in den unterschiedlichen Feldern für das Projektionssystem Laser LCoS. ....	273

---

## V ANHANG

# Anhang A: ABKÜRZUNGEN & SYMBOLE

## A.1 ABKÜRZUNGEN

a-Si TFT	Amorphous silicon thin-film transistor
CW	continuous wave
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Micromirror Device
DoF	Depth of field
ECE	Economic Commission for Europe
FVF	Flimmerverschmelzungsfrequenz
GLV	Grating Light Valve
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
ITO	Indium tin oxide
LC	Liquid Crystal
LCD	Liquid Crystal Display
LCoS	Liquid Crystal on Silicon

---

$\mu$ AFS	$\mu$ AFS – micro-structured Adaptive Front-lighting System
MLA	Mikrolinsenarray
PBS	Polarizing Beamsplitter
p-Si TFT	Polysilicon thin-film transistor
RGB	Rot, Grün, Blau
RMS	Root Mean Square
SI	Système international d'unités
SPP	Strahlparameterprodukt
TFT	Thin-film transistor
TIR	total internal reflection
VAF	Vollautomatisiertes Fahren

## A.2 SYMBOLE

$A_{\text{im}}$	Flächeninhalt des Bildgebers
$A_{\text{Spot}}$	Flächeninhalt des Laserspots auf der Projektionsfläche
$b$	Bildweite
$b_{\text{Proj}}$	Breite des Laserstrahls (auf der Projektionsfläche)
$C_3$	Korrekturfaktor für den photochemischen Grenzwert
$C_5$	Korrekturfaktor für eine Folge von Einzelpulsen
$C_6$	Korrekturfaktor für die Größe der scheinbaren Quelle
$d$	Distanz
$dA$	Flächenelement
$D_{\text{Laser},x}$	Durchmesser des Laserspots in x-Richtung
$D_{\text{Laser},y}$	Durchmesser des Laserspots in y-Richtung
$D_{\text{op}}$	Durchmesser der Optik
$d_{\text{proj}}$	Projizierte Größe auf dem Projektionsfeld
$\Delta\theta_{xy}$	Temperaturdifferenz zwischen Komponente x und y
$E$	Étendue
$E^*_x$	Korrigierte Beleuchtungsstärke von System x
$E_{\text{amb}}$	Umgebungsbeleuchtungsstärke

$E_{\text{Thr},0,5}$	Schwellwert der Beleuchtungsstärke, wenn 50% die Projektion korrekt erkennen
$E_{\text{Thr},1}$	Schwellwert der Beleuchtungsstärke, wenn 50% die Projektion korrekt erkennen
$f$	Brennweite
$\phi_e$	Strahlungsfluss
$\phi_v$	Lichtstrom
$g$	Gegenstandsweite
$GZS_x$	Grenzwert zulässiger Strahlung bewertet für die Situation $x$
$h$	Höhe
$I_v$	Lichtstärke
$k_m$	Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents
$L$	Leuchtdichte
$l^*$	projizierte Länge
$L_h$	horizontale Breite der nicht transmissiven Bahnen eines Displays
$L_v$	vertikale Breite der nicht transmissiven Bahnen eines Displays
$L_x$	Länge der Komponente $X$
$M^2$	Beugungsmaßzahl
$p$	Pixelpitch
$p^*$	Projizierter Pixelpitch
$P_{\text{Elektronik}}$	Leistungsaufnahme der Elektronik
$P_h$	horizontaler Pixelpitch eines Displays
$P_{\text{LED}}$	Leistungsaufnahme der LED
$P_R$	Reflexionskoeffizient an der strahlteilenden Oberfläche

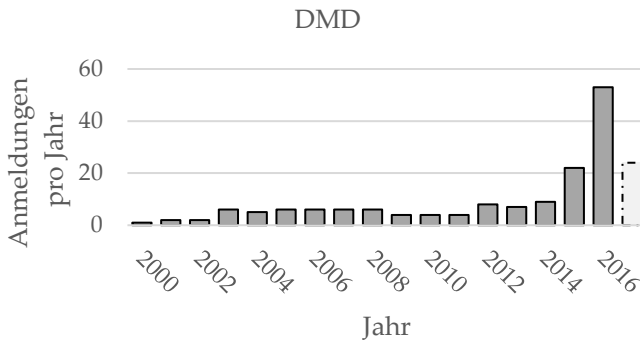
$P_T$	Transmissionskoeffizient an der strahlteilenden Oberfläche
$P_v$	vertikaler Pixelpitch eines Displays
$R_{th-xy}$	Wärmewiderstand zwischen X und Y
$T_2$	Charakteristische Zeit ab welcher Augenbewegungen einen dominierenden Einfluss auf den maximalen zulässigen Grenzwert haben
$Th_{0,5}$	Schwellwert für „50% der Probanden erkennen Projektion korrekt“
$Th_1$	Schwellwert für „100% der Probanden erkennen Projektion korrekt“
$T_i$	i-te Transmissionskoeffizient
$t_p$	Dauer eines Pulses
$T_x$	Temperatur an der Komponente X
$V(\lambda)$	Hellempfindlichkeitskurve
$\Omega$	Raumwinkel
$w_0$	halber Durchmesser der Strahltaile
$X_{\mu AFS}$	Vergleichsfaktor zwischen $\mu AFS$ und absorbierenden Systemen
$z_r$	Rayleigh-Länge
$\alpha_{Laser}$	Divergenzwinkel eines Lasers
$\beta$	Schrägstellung der Projektion
$\beta_{Kolli}$	Divergenzwinkel nach der Kollimation
$\beta_{Laser}$	Divergenzwinkel eines Lasers senkrecht zu $\alpha_{Laser}$
$\beta_u$	Unschärfewinkel
$\gamma$	Öffnungswinkel der Pupille im Abstand von zehn Zentimetern
$\eta$	Effizienz
$\theta$	FOV der Projektion



$\theta_{ab}$	Winkel eingeführt durch Aberrationen
$\theta_{Diff}$	Winkel eingeführt durch Beugungseffekte
$\theta_{LED}$	Halber Abstrahlwinkel der LED

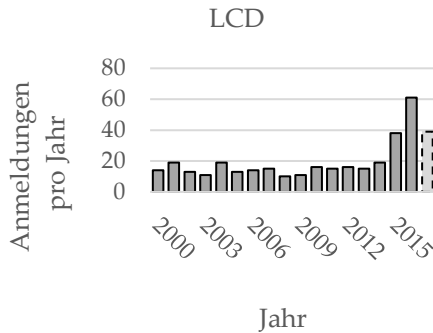
## Anhang B: WEITERER ANHANG

### B.1 PATENTANALYSE



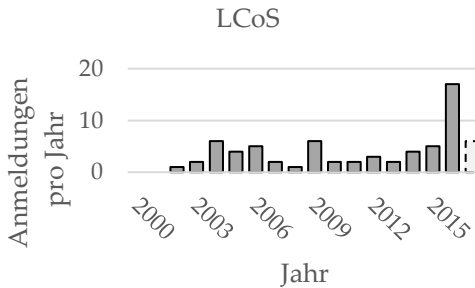
**Abbildung B. 1:** Anmeldungen pro Jahr, welche unter der Patentklassifikation B60Q1 sowie unter den Schlagworten „DMD“ und „Projection“ zu finden sind (für 2017 waren zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht alle Anmeldungen verfügbar).

**Abbildung B. 1** zeigt die Anmeldungen pro Jahr zwischen 2000 und 2017 für DMD-Konzepte. Hier und folgend gilt, dass die Zahl für 2017 noch weiter steigen kann.



**Abbildung B. 2:** Anmeldungen pro Jahr, welche unter der Patentklassifikation B60Q1 sowie unter den Schlagworten „LCD“ und „Projection“ zu finden sind (für 2017 waren zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht alle Anmeldungen verfügbar).

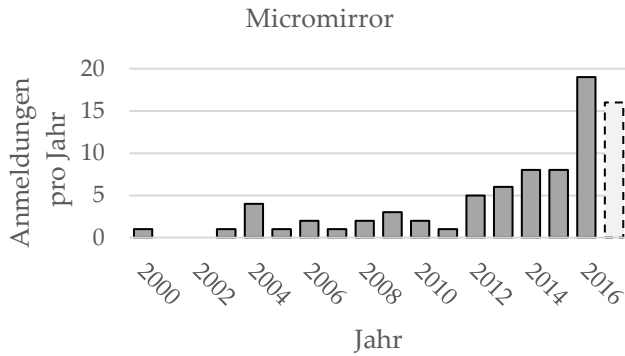
In **Abbildung B. 2** sind die Anmeldungen der Patentklasse für LCD-Systeme dargestellt. Ein leicht verändertes Bild zeigt sich für die LCoS-Technologie (siehe **Abbildung B. 3**). Die Gesamtzahl an Anmeldungen ist, verglichen mit Offenlegungsschriften, welche LCD beinhalten um den Faktor 1/5 geringer. In den Jahren 2000 wie auch 2001 gab es keine Anmeldung hinsichtlich der oben genannten Kombination. Zwischen 2002 und 2015 variiert die Anzahl der Anmeldungen zwischen eins und sechs. Auch hier ist 2016 das Jahr mit den meisten Anmeldungen.



**Abbildung B. 3:** Anmeldungen pro Jahr, welche unter der Patentklassifikation B60Q1 sowie unter den Schlagworten „LCoS“ und „Projection“ zu finden sind (für 2017 waren zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht alle Anmeldungen verfügbar).

Der Überblick über die Patentsituation für einen Mikrospiegel als bildgebendes Element ist in **Abbildung B. 4** dargestellt. Hier wurden zusätzlich die Einträge entfernt, die „DMD“ enthalten, um eine Auswahl der falschen Technologie zu vermeiden. Wie bei den vorhergehenden Technologien gibt es in 2016 die meisten Anmeldungen im o.g. Kontext.

Für alle Technologien ist ersichtlich, dass die Anmeldungen in den Jahren zwischen 2000 und 2014 jeweils geringer ausfielen als im Jahr 2016. Ebenfalls ist allen Technologien einig, dass 2016 das Jahr mit den meisten Anmeldungen war. Da zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht alle Anmeldungen für 2017 einsichtbar waren, ist ein Anwachsen der Zahl noch möglich.



**Abbildung B. 4:** Anmeldungen pro Jahr, welche unter der Patentklassifikation B60Q1 sowie unter den Schlagworten „Micromirror“ und „Projection“ zu finden sind.

## **B.2 ÜBERBLICK ÜBER KOMPONENTEN UND PROJEKTIONSTECHNOLOGIEN**

Um Systeme bewerten zu können, ist es notwendig, die Grenzen der wichtigsten Technologien in diesem Bereich zu kennen. Diese werden für die wichtigsten Bestandteile verschiedener Projektionssysteme die in diesem Anhang dargelegt.

### **B.2.1 LICHTQUELLEN**

#### *Weißes LEDs*

Die Generierung von Weißlicht durch eine LED ist allgemein bekannt und wird nicht näher beschrieben. Die Leuchtdichten typischer LEDs für den Automotive-Einsatz sind von Schildmann et al. [98] mit 80 cd/mm<sup>2</sup> für High Power LEDs (3W) und mit ca. 200 cd/mm<sup>2</sup> für High Current LEDs (3W – 10W) angegeben [99]. Die automotive qualifizierten LEDs sind über den Temperaturbereich von -40 bis 140°C betriebsfähig. Dabei schwankt die Farbtemperatur nur geringfügig und bleibt im durch die ECE-Regelungen beschriebenen Farbraum für weiß [62, 100].

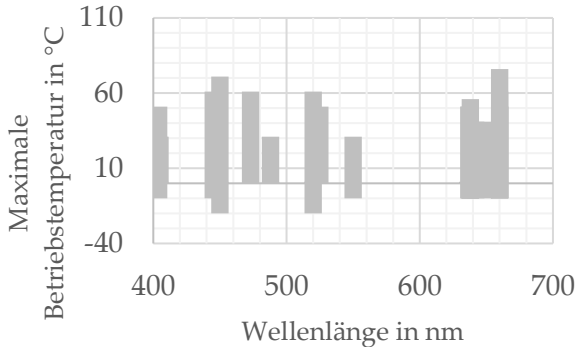
*RGB-LEDs*

Die LED OSOLON® Signal LCB CRBP [101], die LED KP CSLNM1.F1 [102] und OSOLON® Signal LJCKBP zeigen nur geringe Variationen Farbtemperatur über den Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $120^{\circ}\text{C}$  über alle Helligkeitsklassen [103]. Bei einer Farbmischung sind diese LEDs ebenso für Automobilanwendungen geeignet.

*Phosphorkonvertiertes Laserlicht*

Bei der Konvertierung von blauem Laserlicht mithilfe von Phosphor zu weißem Licht können Leuchtdichten über  $300\text{ cd/mm}^2$  [104] und ein Lichtstrom von ca. 350 lm erreicht werden [105]. Höhere Lichtströme können mit einer Vergrößerung der Konversionsfläche erzielt werden. Durch eine räumliche Trennung des Lasers und des Phosphors können Leuchtdichten von  $1000\text{ cd/mm}^2$  und einem Lichtstrom von 531 lm ermöglicht werden. Somit entstehen jedoch höhere Anforderungen an den Bauraum [106].

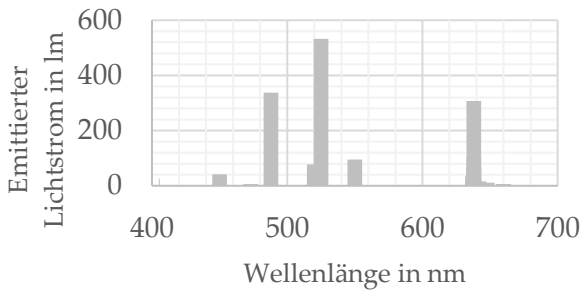
RGB-Laserdioden



**Abbildung B. 5:** Überblick über die Betriebstemperaturen unterschiedlicher Laserdioden von den Herstellern Arima, Mitsubishi, Nichia, Osram und Ushio.

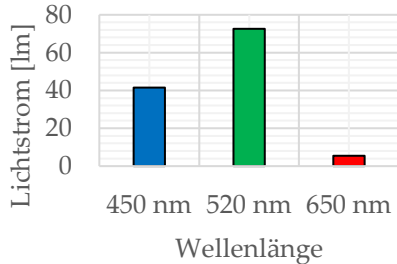
In **Abbildung B. 5** sind die maximalen Betriebstemperaturen unterschiedlicher Laserdioden von den Herstellern Arima, Osram und Ushio dargestellt. Für jegliche Dioden ist die maximale Temperatur 75°C. Weiterhin weisen diverse Laserdioden minimale Betriebstemperaturen von 0°C, -10°C und einige -20°C vor. Die Automotive-Anforderungen bezüglich Temperatur können somit nur schwer erfüllt werden. In **Abbildung B. 6** wird der emittierte Lichtstrom unterschiedlicher Laserdioden über den spektralen Bereich dargestellt.





**Abbildung B. 6:** Emittierter Lichtstrom unterschiedlicher Laserdioden über den sichtbaren Wellenlängenbereich, wobei der Lichtstrom näherungsweise bestimmt wurde. Dabei wurde angenommen, dass die Laserdiode nur Licht mit einer typischen Wellenlänge mit der Breite von einem nm emittiert. Diese Annahme ist insbesondere bei Multimoden Laserdioden nur näherungsweise korrekt.

Es ist ersichtlich, dass in jedem Spektralbereich Laserdioden mit einem (berechnetem) emittierten Lichtstrom über 200 lm vorhanden sind. Bei den Laserdioden mit einem hohen Lichtstromoutput im blauen und im grünen Bereich handelt es sich um Multimoden Laserdioden [107 bis 109] mit einer maximalen Betriebstemperatur jeweils unter 55°C und einer minimalen Betriebstemperatur von 0°C. Die Leistungsstärkste Laserdiode im roten Bereich bei 638 nm arbeitet bei Betriebstemperaturen von -10°C bis 30°C. In **Abbildung B. 7** ist der maximale Lichtstromoutput für maximale Betriebstemperaturen größer als 55°C dargestellt.



**Abbildung B. 7:** Maximaler Lichtstrom verschiedener Dioden für den blauen, den grünen und den roten Spektralbereich für Betriebstemperaturen oberhalb 55°C.

Es ist ersichtlich, dass insbesondere Laserdioden im roten Wellenlängenbereich bei höheren Betriebstemperaturen (die bei einer Umgebungstemperatur von 40°C sehr schnell erreicht werden können) einen geringen Lichtstrom zur Verfügung stellen.

### B.2.2 BILDGEBER UND POLARISATOREN

Die Vielzahl an Bildgebern, welche auf dem Markt vorhanden sind, lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Flächenmodulierte Systeme, sowie strahlgeführte Systeme. Folgend werden die Begrenzenden Faktoren durch die vorhandenen Bildgeber beschrieben.

#### *Digital Micromirror Device*

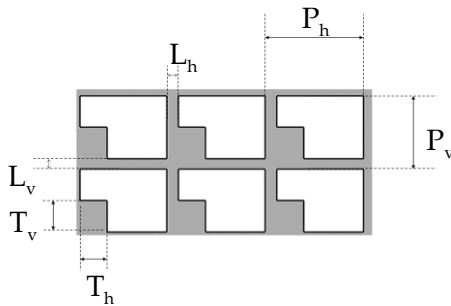
Bei einem DMD kann eine Vielzahl kleiner Spiegel in zwei verschiedene Zustände versetzt werden (ON-State und OFF-State). Typi-

scherweise wird der DMD- Chip durch kollimiertes LED oder Laserlicht beleuchtet. Licht, welches auf die Spiegel im ON-State trifft wird in die Projektionsoptik reflektiert. Licht, welches auf die Spiegel im OFF-Zustand trifft, wird auf einen Absorber gelenkt. Um mit diesem binären System Grauwerte darstellen zu können, kann der Spiegel mit Frequenzen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz zwischen ON und OFF-State springen. Je nach Verhältnis der Aufenthaltszeiten  $t_{ON}$  für die Verweildauer pro Sekunde im „ON-State“ und  $t_{OFF}$  (Verweildauer im „OFF State“) können unterschiedliche Grautöne dargestellt werden. Für die diversen Anforderungen unterschiedlicher Systeme gibt es verschiedene DMD-Panels.

#### *Liquid Crystal Displays (LCD und LCoS)*

Liquid Crystal- (LC-) Materialien sind in der Lage, die Polarisation des einfallenden Lichtes zu ändern [110]. Diese Eigenschaft wird genutzt, um die Amplitude eines Elektromagnetischen Felds zu manipulieren. LC-Systeme können in transmissive (meist LCD genannt) und reflektive Systeme (meist LCoS genannt) unterteilt werden. Das Funktionsprinzip eines LCD- oder LCoS-Systems ist allgemein bekannt und wird nicht weiter erläutert [111, 112].

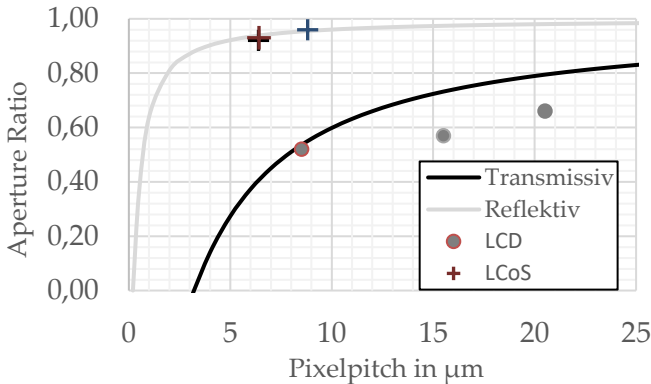
Um die Pixel eines solchen Systems einzeln ansteuern zu können, sind dünne Leiterbahnen sowie Transistoren im Panel eingebracht, welche (insbesondere bei transmissiven Systemen) einen Anteil des einfallenden Lichtstroms absorbieren (vergleiche **Abbildung B. 8**).



**Abbildung B. 8:** „Aperture Ratio“ als Verhältnis aus transmissiver (weiß) und nicht transmissiver Fläche (grau).

Der Anteil von transmittiertem zu einfallendem Licht wird durch  $\eta_{\text{Aperture}}$  angegeben. Dieser Faktor ist abhängig von der von den Leiterbahnen und Transistoren eingenommenen Fläche. Unterschiedliche Aktiv-Matrix-Technologien wie a-Si TFT, oder p-Si TFT ergeben aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften verschiedene Rahmenbedingungen für Displays hinsichtlich minimaler/ maximaler Displaygröße, Aperture Ratio, Stabilität, etc. [113]. Unter der Annahme, dass die Strukturgrößen der Ansteuerelektronik konstant sind, ergibt sich aus einer Auswahl aktuell verfügbarer Mikrodisplays der Zusammenhang zwischen Pixelpitch und Aperture Ratio wie in **Abbildung B. 9** dargestellt. Dabei wurde der Chip L3C07U-85G13 herangezogen, um die Variablen  $P_h$ ,  $P_v$ ,  $L_v$ ,  $L_h$ ,  $T_h$  und  $T_v$  analog zu den Ausführungen von Brennescholtz näherungsweise abgeschätzt

[61]. Größere transmissive Displays weisen Aperture Ratios über 80% vor, reflektive (auch sehr kleine) Displays über 92% [61].



**Abbildung B. 9:** Aperture Ratio für die LCDs L3C07U-85G13, L3P14Y-5G00, L3P06S41 [80] und eine extrapolierte mögliche Grenzkurve für transmissive Systeme sowie die Aperture Ratio für die LCoS-Displays SYL2271 [68], HED 7200 [79], HED 1316 [114] und eine extrapolierte mögliche Grenzkurve für reflektive Bildgeber.

Im Markt verfügbare Chips sind ebenfalls in **Abbildung B. 9** dargestellt. Diese liegen unterhalb der ermittelten Kurve, welche somit für die aktuell verfügbaren LCDs eine gute Näherung als obere Grenze darstellt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um ein physikalisches Limit. Alternative Technologien können in der Lage sein, größere Aperture Ratios bei kleineren Pixelpitches zu generieren.

Da sich der Pixelpitch in Bereichen der Wellenlänge bewegt, ist ein Effizienzverlust aufgrund von Beugungseffekten durch den Modulator nicht zu vernachlässigen. Aus dem Dokument [66] wurden folgende Werte für unterschiedliche Pixelpitches extrapoliert.

**Tabelle B 1:** Lineare Extrapolation der Diffraktionseffizienz für eine Optik mit  $F/\#=2$ .

Pixelpitch ( $\mu\text{m}$ )	$\eta_{\text{Diff}}$
4,2	0,77
5,9	0,78
8,0	0,81
10,2	0,83
12,2	0,86
14,3	0,89
16,5	0,91
18,6	0,93
20,8	0,95
23,3	0,98
> 24,9	1

Diese Werte können als Anhaltspunkte interpretiert werden. Für eine genaue Analyse muss das exakte Display-Design (Abstände der Pixel/Größe der Transistoren etc.) für eine Simulation/Messung vorliegen.

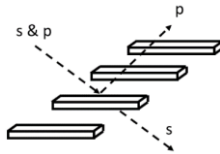
*Polarisatoren*

Für die Verwendung von LC-Displays werden Polarisatoren verwendet. Fast alle Polarisatoren basieren auf den vier physikalischen Prinzipien: Dichroismus, Reflexion, Streuung und Doppelbrechung [115]. Folgend werden drei unterschiedliche Polarisatoren und die wichtigsten Bestandteile kurz beschrieben: der Dielektrischer-, der Polymerfilm- und Drahtgitter- oder auch Wiregridpolarisator.

Das Prinzip des Dielektrischen Polarisators beruht auf den unterschiedlichen Reflexionsspektren der verschiedenen Polarisationsrichtungen beim Übergang zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Die dielektrischen Schichten bestehen typischerweise aus  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  und  $TaO_5$ . Diese anorganischen Stoffe haben alle geringe Ausdehnungskoeffizienten sowie Schmelztemperaturen im Bereich  $T_{melt,i} > 1000^\circ C$ . Kommerziell verfügbare Systeme können in einem Temperaturbereich von  $-150^\circ C$  bis  $125^\circ C$  verwendet werden [116]. Darüber hinaus sind Schwankungen des Brechungsindex über den sichtbaren Spektralbereich sowie über den Temperaturbereich sehr gering [116]. Die Qualität der Strahlteilung für divergente oder schräg einfallende Lichtbündel sinkt jedoch stark. In [117] wurde der Kontrast eines dielektrischen Polarisators innerhalb des sichtbaren Spektrums über verschiedene Winkelbereiche vermessen. Bereits bei Winkeländerungen von  $\pm 5^\circ$  ergeben sich starke (wellenlängenabhängige) Unterschiede in der Transmission.

Ein Polymerfilmpolarisator weist oftmals größere thermische Einschränkungen als dielektrische Polarisatoren vor. Die Lagerungstemperatur eines Polymerfilm Polarisators ist zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $60^{\circ}\text{C}$  angesiedelt [118]. Ein Einsatz dieser Polarisatoren im Automotivesektor ist als kritisch einzustufen.

Bei einem Wiregrid Polarisator werden wie bei den vorherigen Systemen zwei Prismen verkittet. In der Grenzschicht der Prismen liegen diverse metallische Leiterbahnen, wie in **Abbildung B. 10** dargestellt.



**Abbildung B. 10:** Die EM-Welle trifft auf die metallischen Leiterbahnen, wobei die s-polarisierte Komponente transmittiert und die p-polarisierte Komponente reflektiert wird.

Die Bestandteile des Wiregrid Polarisators sind neben dem Glasprisma feine metallische Leiterbahnen. Diese haben einen geringen Ausdehnungskoeffizienten (beispielsweise hat Aluminium einen Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha \approx 23,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ . Bei einem Temperaturbereich von  $-40^{\circ} \text{C}$  bis  $100^{\circ} \text{C}$  ergibt sich ein prozentualer Unterschied (vom Minimum bis zum Maximum) von 0,3%. Die Schmelztemperatur von beispielsweise Aluminium liegt bei  $660,3^{\circ}\text{C}$  und ist somit für Automobilanwendungen geeignet.



### *Matrix LED*

Es sind unterschiedlichste Matrix-LED Systeme auf dem Markt erhältlich. Durch die Ansteuerung von beispielsweise 84 Segmenten können unterschiedliche Lichtverteilungen erzeugt werden. Eine weitere Entwicklung ist das  $\mu$ AFS System, welches aus  $32 \times 32$  Pixeln und somit aus 1024 einzel-LEDs besteht und matrixförmig eine Vielzahl von Bildern innerhalb der technologiebedingten Auflösungsgrenze darstellen kann. Dieses Produkt wird unter EVIYOS 2.0 weiterentwickelt [75].

### *Strahlgeführte Systeme*

Ein ausführlicher Überblick über die unterschiedlichen Systeme findet sich in der Arbeit von de Wille wieder [40]. Folgend werden die zwei gängigsten Konzepte kurz erläutert.

### *Blauer Laser, Mikrospiegel und Phosphorkonverter*

Dieses System wurde in der Arbeit von Gut [4] näher beschrieben. Blaues Laserlicht wird von einem Mikrospiegel auf einen Phosphor gelenkt, wo durch Lumineszenzkonversion weißes Licht erzeugt wird. Dieses wird über eine Abbildungsoptik in den Verkehrsraum abgebildet. Hierbei handelt es sich um ein hybrides System, welches zwar aus strahlgeführten Komponenten besteht, die Bilderzeugung jedoch flächenmoduliert geschieht.

*RGB Laser, und Mikrospiegel*

Ein einfacher Aufbau besteht aus einer oder mehreren Laserdioden, diversen Strahlkombinieren und einem Mikrospiegel. Die Farbmischung geschieht über Verhältnisse des Lichtstroms der einzelnen Dioden.

### B.3 BERECHNUNGEN ZUR ÜBERTRAGUNG DER AUFLÖSUNGSANFORDERUNGEN AUF MÖGLICHE BAURÄUME DES FAHRZEUGS

Für die Optikauslegung sind der Ort, die Größe und die Qualität der Abbildung die relevanten Parameter. Aufgrund der Vielzahl an Variablen (Einbauort, Dimensionen der Projektion, Projektionswinkel (Winkel zwischen Flächennormalen der Projektionsebene und optischer Achse des Projektionssystems)) werden exemplarisch für einige Anbauorte diese Variablen für verschiedene Projektionsszenarien vorgegeben. Dabei wurden die Mindestanforderungen aus **Tabelle B 2** übernommen, sowie zusätzliche Geometrien aus den bestehenden Projektionsinhalten im Fahrzeug abgeleitet.

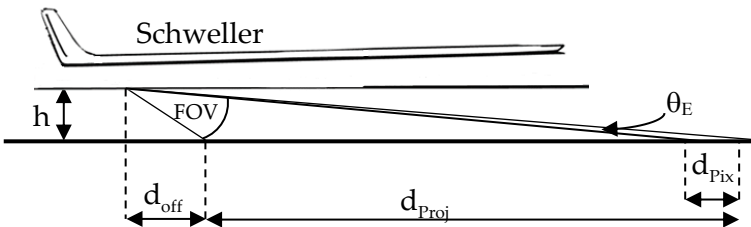
**Tabelle B 2:** Auswahl an unterschiedlichen Anforderungen an die Projektionssysteme.

Anbauort	Verortung Projektionsfeld	Geometrie Projektionsfeld
Design Außen- spiegel	Wagenseite	Quadrat mit Seiten- länge $\approx 0,5$ m
Sicherheit/ Kom- munikation Au- ßenspiegel	Wagenseite	Quadrat mit Seiten- länge $\approx 1$ m
Interaktion Au- ßenspiegel	Wagenseite	Rechteck mit Seiten- länge $0,1$ m x $0,5$ m

Sicherheit/ Kommunikation Scheinwerfer	Vor dem Fahrzeug	Quadrat mit Seitenlänge $\approx 1$ m
Design 1 Schweller	Wagenseite	Quadrat mit Seitenlänge $\approx 0,5$ m
Design 2 Schweller	Entlang der Wagenseite	Rechteck mit $a \approx 2$ m und $b \approx 0,50$ m

Dabei ist das Design 2 aus dem aktuellen Lichtteppich-Design abgeleitet.

Folgend wird die exemplarische Berechnung des „Field of Views“ (FOV) sowie die benötigte Winkelauflösung für eine Variante bei der Projektion aus dem Schweller dargestellt.



**Abbildung B. 11:** Definition der Variablen  $h$ ,  $d_{off}$ ,  $d_{Proj}$ ,  $d_{Pix}$ ,  $\alpha$ , FOV.

Wie in **Abbildung B. 11** dargestellt, werden zur Berechnung des FOVs und dem erlaubten Fehler der Abbildung im Winkel  $\theta_E$  die folgenden Variablen verwendet: Höhe  $h$ , gibt den Abstand der Projektionseinheit zur Projektionsebene an, der Offset  $d_{off}$ , welcher den Abstand zwischen Beginn der Grafik und senkrechte Projektion des Anbauortes des Projektors auf die Projektionsebene beschreibt, der Durchmesser der Projektion  $d_{proj}$  und der Durchmesser des maximal erlaubten Abbildungsfehlers  $d_{pix}$ .

$$FOV = \tan^{-1}\left(\frac{d_{off} + d_{proj}}{h}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{d_{off}}{h}\right) \quad (\text{B.1})$$

$$\theta_E = \tan^{-1}\left(\frac{d_{off} + d_{proj}}{h}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{d_{off} + d_{proj} - d_{pix}}{h}\right) \quad (\text{B.2})$$

**Tabelle B 3:** Aus FOV und erlaubter Fehler im Winkel, aus den gegebenen Anforderungen.

Anbauort	FOV	$\theta_E$
Außenspiegel Design	$\approx 27^\circ$	$\approx 0,13^\circ$
Außenspiegel		
Sicherheit/ Kommunikation	$\approx 53^\circ$	$\approx 0,14^\circ - 0,92^\circ$
Außenspiegel Interaktion	$>11,42^\circ$	$0,17^\circ$
Schweller Interaktion	$\approx 53^\circ$	$0,69^\circ$
Scheinwerfer Sicherheit	$\approx 6,5^\circ$	$\approx 0,017^\circ - 0,09^\circ$
Schweller Design 1	$\approx 103^\circ$	$\approx 0,097^\circ$

---

Schweller Design 2	$\approx 19^\circ$	$\approx 0,002^\circ$
--------------------	--------------------	-----------------------

---

Insbesondere für die Projektion aus dem Schweller ergeben sich anspruchsvolle Winkel. Für das „Design 1“ ergibt sich ein sehr großes FOV, für „Design 2“ extreme Anforderungen an die Abbildungsqualität mit einem erlaubten Fehler von  $0,002^\circ$ .

Zusätzlich sollte das optische System noch eine hohe Tiefenschärfe vorweisen oder scharfe Abbildung auf eine schräge Ebene projizieren. Für die Projektion „Schweller Design 2“ würde ein Bereich hoher Abbildungsqualität in einer Projektionsentfernung zwischen etwa 0,4 m bis etwa 4,4 m benötigt.

Für die Sicherheitsprojektionen können Pixeldurchmesser größer als drei mm genutzt werden. Hier wurde ein Bereich von 3 bis 20 mm gewählt. Je nach dargestelltem Symbol kann die Auflösung auch nach oben abweichen.

Die Interaktionsprojektion wird hinsichtlich der Auflösung mit den Designanforderungen gleichgesetzt, da das Interaktionsfeld sehr klein ist und somit eine hohe Auflösung notwendig ist, um Inhalte darstellen zu können.

**Tabelle B 4:** Genutzte Zahlenwerte für die unterschiedlichen Anbau- und Projektionsorte.

Anbauort	$d_{\text{off}}$	$d_{\text{proj}}$	$h$	$d_{\text{Pix}}$
Außenspiegel Design	0 m	0,5 m	1 m	3 mm

ANHANG

---

Außenspiegel				3 mm–
Sicherheit/ Kommunika- tion	-0,5 m	1 m	1 m	20 mm
Außenspiegel Interaktion	0 m	0,2 m	1 m	3 mm
Schweller Interaktion	0 m	0,2m	0,2 m	3 mm
Scheinwerfer Sicherheit	2 m	1 m	0,75 m	3 mm– 20 mm
HAF Scheinwerfer	2 m	1 m	0,75 m	20 mm
Schweller Design 1	-0,25 m	0,5 m	0,2 m	3 mm
Schweller Design 2	0,5 m	3,5 m	0,2 m	3 mm

---

**B.4 FLIMMERVERSCHMELZUNGSFREQUENZ**

<b>Proband 1, Alter 30 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	1	3	3	4	4	5
Wert für 60 lx	1	1	2	2	3	4	4

<b>Proband 2, Alter 32 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	2	3	3	4	4	4
Wert für 60 lx	1	1	1	2	3	3	4

<b>Proband 3, Alter 32 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	2	3	3	4	4	4
Wert für 60 lx	1	1	1	2	3	3	4

<b>Proband 4, Alter 37 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	2	3	4	3	5	5
Wert für 60 lx	1	1	1	2	3	4	4



ANHANG

<b>Proband 5, Alter 28 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	1	2	3	4	5	5
Wert für 60 lx	1	1	1	2	3	4	4

<b>Proband 6, Alter 22 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	1	2	3	4	2	3
Wert für 60 lx	1	1	1	1	2	2	2

<b>Proband 7, Alter 46 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	1	2	3	4	4	4	4
Wert für 60 lx	1	1	2	3	3	2	3

<b>Proband 8, Alter 20 Jahre</b>							
$E_{amb}$ in lx	200	60	20	10	3	0,3	0
Wert für 100 lx	2	2	2	3	4	4	5
Wert für 60 lx	1	1	1	2	3	4	4

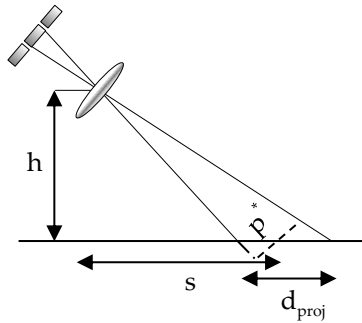
## B.5 REFLEXION VON POLARISIERTEM LICHT AUF DER STRAÙE

Winkel	L s-pol. Licht	L p-pol. Licht
0°	230 cd/m <sup>2</sup>	50 cd/m <sup>2</sup>
15°	215 cd/m <sup>2</sup>	46 cd/m <sup>2</sup>
30°	115 cd/m <sup>2</sup>	41 cd/m <sup>2</sup>
45°	70 cd/m <sup>2</sup>	38 cd/m <sup>2</sup>
60°	55 cd/m <sup>2</sup>	40 cd/m <sup>2</sup>
75°	38 cd/m <sup>2</sup>	40 cd/m <sup>2</sup>
90°	35 cd/m <sup>2</sup>	38 cd/m <sup>2</sup>
270°	32 cd/m <sup>2</sup>	39 cd/m <sup>2</sup>
285°	38 cd/m <sup>2</sup>	41 cd/m <sup>2</sup>
300°	50 cd/m <sup>2</sup>	45 cd/m <sup>2</sup>
315°	64 cd/m <sup>2</sup>	42 cd/m <sup>2</sup>
330°	115 cd/m <sup>2</sup>	48 cd/m <sup>2</sup>
345°	215 cd/m <sup>2</sup>	45 cd/m <sup>2</sup>

---

**B.6 PIXELGRÖÖE AUF DER STRAÖE**

Durch die schräge Projektion wird der Strahldurchmesser, wie in **Abbildung B. 12** dargestellt, zusätzlich vergrößert. Weiterhin muss der Fehlerwinkel  $\theta_E$  beachtet werden. Bei einer F-Zahl von zwei ergibt sich für den Durchmesser der Projektionsoptik:  $D=10$  mm. Dies führt zu einem zusätzlichen Winkel von mindestens  $\theta_E = \theta_{\text{abb}} + \theta_{\text{Diff}} \geq 0.0045^\circ$  (bei  $\lambda = 650$  nm).



**Abbildung B. 12:** Schematische Darstellung der schrägen Projektion. „Aperture Ratio“ als Verhältnis aus transmissiver (weiß) und nicht transmissiver Fläche (grau).

Der Durchmesser  $d$  kann über

$$p^* = 2 \cdot \sqrt{h^2 + s^2} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\theta_E}{2}\right) \quad (\text{B.3})$$

ermittelt werden. Der Spotdurchmesser der Projektion wird (bei kleinen Winkeln von  $\alpha$ ) über

$$d_{proj} \approx \frac{p^*}{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{s}{h}\right)\right)} \quad (\text{B.4})$$

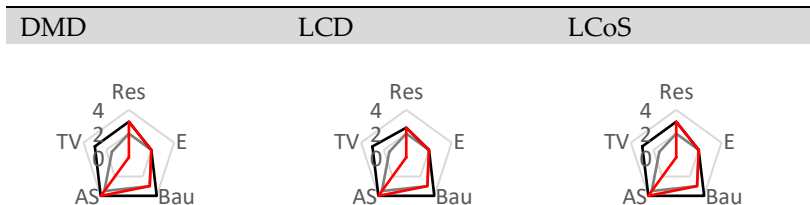
berechnet. Für unterschiedliche Anbau- und Projektionsorte ergeben sich je nach Pixelpitch (bei idealer Abbildung) für die unterschiedlichen Technologien ebenfalls unterschiedliche kleinste Pixeldurchmesser. Aus den Pixelgrößen des Bildgebers lässt sich die Spotgröße auf der Straße berechnen. Je größer der Abstand und je schräger die Projektion ist, desto größer wird der auf die Straße projizierte Durchmesser des Pixels.

## B.7 BEWERTUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN SYSTEME

Folgend sind die Bewertungsdiagramme für die unterschiedlichen Anwendungen aufgeführt. Dabei gilt für jede Grafik:

- Anforderung
- Projektionssystem (LED-System)
- Projektionssystem (Laser-System)

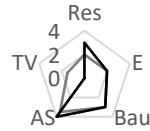
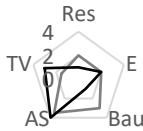
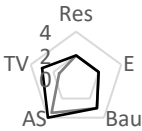
*Design - Außenspiegel*



ANHANG

$\mu$ LED

Phosphorkonvertier-ter Scanner RGB-Laserscanner

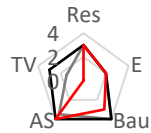
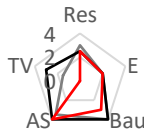
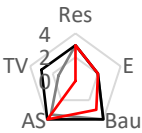


*Design – Schweller I*

DMD

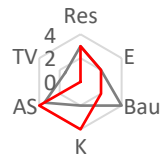
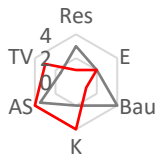
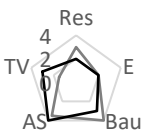
LCD

LCoS



$\mu$ LED

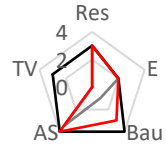
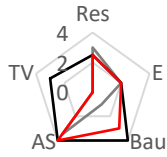
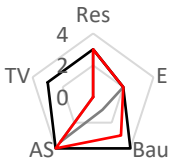
Phosphorkonvertier-ter Scanner RGB-Laserscanner



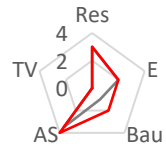
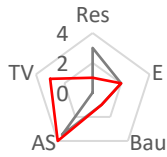
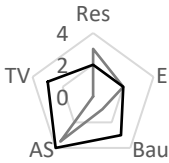


*Design - Scheinwerfer*

**DMD                      LCD                      LCoS**



**μLED                      Phosphorkonvertier-                      RGB-Laserscanner  
ter Scanner**

























## B.8 VERMESSUNG LCoS-PROTOTYP

**Tabelle B 5:** Gemessene Beleuchtungsstärken für einen Projektionsabstand von einem Meter für die unterschiedlichen Systeme (LCoS mit dielektrischem Beamsplitter und LCoS mit Wiregrid Beamsplitter).

Feld (x)	Grauwert	E <sub>DE</sub>	Kontrast	E <sub>WG</sub>	Kontrast
			E <sub>DE</sub>		E <sub>WG</sub>
0	weiß	120,2	3,9	65,0	4,0
	schwarz	31,0		16,4	
1	weiß	61,6	5,1	28,9	6,7
	schwarz	12,0		4,3	
2	weiß	89,5	6,6	45,3	10,1
	schwarz	13,5		4,5	
3	weiß	94,7	5,6	48,8	7,6
	schwarz	16,9		6,4	
4	weiß	95,4	5,6	48,4	6,9
	schwarz	17,0		7,0	
5	weiß	69,3	8,3	34,9	10,0
	schwarz	8,4		3,5	
6	weiß	76,1	4,3	36,0	5,7

ANHANG

	schwarz	17,9		6,36	
7	weiß	104,6	4,1	54,2	4,6
	schwarz	25,7		11,7	
8	weiß	108,5	4,5	56,9	5,3
	schwarz	23,9		10,8	
9	weiß	80,9	6,9	41,8	9,5
	schwarz	11,7		4,4	
10	weiß	82,1	6,2	37,6	8,7
	schwarz	13,2		4,3	
11	weiß	98,6	4,5	49,7	6,2
	schwarz	22,0		8,0	
12	weiß	98,8	5,6	50,3	7,2
	schwarz	17,6		7,0	
13	weiß	86,3	5,1	43,1	6,3
	schwarz	17,0		6,8	
14	weiß	63,5	3,8	33,9	6,4
	schwarz	16,9		5,3	

**Tabelle B 6:** Gemessene Beleuchtungsstärken in den unterschiedlichen Feldern für das Projektionssystem Laser LCoS.

ANHANG

---

Feld (x)	Grauwert	E	Kontrast E
0	weiß	253	30,5
	schwarz	8,3	
1	weiß	251	29,2
	schwarz	8,6	
2	weiß	258	27,8
	schwarz	9,3	
3	weiß	249	25,7
	schwarz	9,7	
4	weiß	242	31,8
	schwarz	7,6	
5	weiß	217,0	37,4
	schwarz	5,8	
6	weiß	250	25,8
	schwarz	9,7	
7	weiß	257,0	26,2
	schwarz	9,7	
8	weiß	241,0	36,0
	schwarz	6,7	
9	weiß	216,0	38,6
	schwarz	5,6	
10	weiß	230,0	36,5
	schwarz	6,3	
11	weiß	251,0	34,9
	schwarz	7,2	
12	weiß	239,0	36,2

---

---

ANHANG

---

	schwarz	6,6	
13	weiß	235,0	42,7
	schwarz	5,5	
14	weiß	210,0	38,2
	schwarz	5,5	
Durchschnitt	weiß	239,9	33,2
	schwarz	7,5	

---

# Anhang C: VERÖFFENTLICHUNGEN UND PATENTANMELDUNGEN

## C.1 KONFERENZBEITRÄGE UND POSTER

Bremer, C; Lewerich, B; Neumann, C

From static to dynamic projection in automotive - State of the art and future prospects; In: Aachen Polymer Optics Days 2018

Bremer, C; Lewerich, B; Neumann, C

Realisierungsmöglichkeiten für hochaufgelöste Umfeldprojektionen im Automobil- Bewertung unterschiedlicher Technologien; In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.). Optische Technolo-gien in der Fahr-zeugtechnik: Tagungsband. Karlsruhe: 2018.

Bremer, C; Lewerich, B; Neumann, C

Technological and physiological evaluation of novel projection systems. In: automotive, Société des Ingénieurs de l'Automobile (Hrsg.). Vision 2018: Tagungsband. Paris 2018.

Bremer, C; Lewerich, B; Hendricks, F; Neumann, C

LCoS projection system. In: T. Q. Khanh (Hrsg.): 13th International Symposium on Automotive Lighting: Tagungsband. Darmstadt: 2019.

Bremer, C, Neumann, C

Dynamic projections. Technological evaluation of near field projections. Poster BMW Group Promotion Dialogtag 2018

Bremer, C; Neumann, C

Near Field Projection in Automotive. In Electronic Displays Conference, Nürnberg, 2019

## C.2 PATENTANMELDUNGEN

Bremer, C; Uebler, R

Kraftfahrzeug mit einer Umfeldbeleuchtungseinrichtung. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 11.10.2019. Veröffentlichungsnr.: DE201910127406

Bremer, C

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 08.10.2019. Veröffentlichungsnr.: DE201910126999

Bremer, C

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 24.09.2019. Veröffentlichungsnr.: DE201910125571



Bremer, C; Schober, T

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 17.12.2018. Veröffentlichungsnr.: DE201810132391

Bremer, C; Schober, T

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 17.12.2018. Veröffentlichungsnr.: DE201810132392

Bremer, C; de Wille, M

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 31.07.2018. Veröffentlichungsnr.: DE201810212706

Bremer, C, Lewerich, B

Beleuchtungsvorrichtung für ein Kraftfahrzeug. Offenlegungsschrift. BMW AG. Anmeldedatum: 14.03.2018. Veröffentlichungsnr.: DE201810203875

---

---

## VI Literaturangaben

- [1] Hamm, M. u. Hinterwaelder, C.: Road Projections of Turn Signals. Investigations from Audi's Michael Hamm and Christian Hinterwaelder. Lighting & ADAS. Lighting News (2020)
- [2] Groeneveld, K. u. Becker, K.: Es werde Licht: Die Leuchtkraft der LED-Technologie (2016)
- [3] Stefan Grötsch: Integrierte  $\mu$ -strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme ( $\mu$ -AFS) (2013)
- [4] Gut, C.: Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme, Karlsruher Institut für Technologie Dissertation. Karlsruhe 2017
- [5] Gut, C., Fiege, M. u. Böke, B.: DIGITAL LIGHT – Experiences with the development of high resolution headlights at Daimler. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017
- [6] Gocke, T., Weber, S. u. Sieler, M.: Lighting innovations of future BMW vehicles. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): 11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015. Proceedings

- of the conference. Darmstädter Lichttechnik, Volume 16.  
[München]: [Utz] 2015
- [7] Mini: MINI Vision Next 100, 2020.  
<https://www.mini.de/next100>, abgerufen am: 04.05.2020
- [8] Roth, J., Wallaschek, J., Kloppenburg, G., Lachmayer, R., Meyer, B. u. Thomschke, S.: RGB-LASER scanning module for onroad projection. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): 11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015. Proceedings of the conference. Darmstädter Lichttechnik, Volume 16.  
[München]: [Utz] 2015
- [9] Enders, M.: Pixellight. Darmstadt 2001
- [10] Kauschke, R., Eichhorn, K. u. Wallaschek, J.: Aktive Scheinwerfer zur subtraktiven Lichtverteilungserzeugung. DGaO Proceedings 2004 2004
- [11] Berlitz, S. u. Krstajic, V.: Future of lighting: Aesthetic, Dynamic and Interaction. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): 11th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2015. Proceedings of the conference. Darmstädter Lichttechnik, Volume 16.  
[München]: [Utz] 2015
- [12] Budanow, M., Hausmann, T., Jebas, C. u. Neumann, C.: Future Communication Possibilities with the Driver using the Front Lighting System. In: Conference proceedings Vision 2016
- [13] Omerbegovic, S., Reim Johannes u. Funk, C.: Construction zone light: A study on safety and distraction. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017

- [14] Willeke, B., Hohmann, C., Mundt, D., Köhler, A. u. Thoma, A.: HD Technologies: New Functions and Possibilities for Signal Lighting. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017
- [15] Wilks, C. u. Huester, C.: Vorrichtung, Verfahren, Computerprogrammprodukt und computerlesbares Medium zur visuellen Information eines Fahrzeugführers eines Kraftfahrzeugs. Offenlegungsschrift B60Q1/24 (2016) DE102016124933
- [16] Xavier, M., Weicheng, L., Stephan, S. u. Hafid, E. I.: Method for projecting an image by a projection System of a motor vehicle, and associated projection system. Offenlegungsschrift B60Q (2018) US2018086262
- [17] Omerbegovic, S. u. Reim Johannes: Bereitstellen einer Fahrerunterstützung für einen Fahrer beim Führen eines Kraftfahrzeugs auf einem Verkehrsweg. Offenlegungsschrift B60Q1/24 (2017) DE102017202457
- [18] Augst, A.: Method for displaying information. Offenlegungsschrift B60Q1/26; B60W30/06; G08G1/09 (2006) DE102006050546
- [19] Zinkler, S.: Verfahren zur Unterstützung zum Bilden einer Rettungsgasse. Offenlegungsschrift B60Q1/50 (2018) DE102018004287
- [20] Lee, E., Chang, S. u. Kim, K.: Driver Assistance apparatus and vehicle. Offenlegungsschrift B60Q1/34 (2016) EP3170698

- [21] Yoo Jang Suk: Rear Warning Indicator. Patent B60Q1/00 (2017) KR101927060
- [22] Salter, S., Dellock, P. K., Surman, J., Stuhec, U. u. Gardner, C. L.: Enhanced informational vehicle puddle lamp assemblies. Patent B60Q1/26 (1997) US10160380
- [23] Greenberg, J. A., Hassani, A. u. van Wiemeersch, J. R.: Irisdetektion zur Fahrzeugmerkmalaktivierung. Offenlegungsschrift B60R 25/00 (2018) DE102018121914
- [24] Merlaku, K.: Lichtmarkierungs-System für Fahrzeuge. Offenlegungsschrift B60Q 1/24 (2016) DE 20 2016 004 062
- [25] Friedrich, D., Gössler, T., Meixner, L., Ernhardt, J., Gaedtke, S., Landsherr, T., Elbs, N. u. Schönherr, S.: Utility Vehicle with controlled pattern projection. Offenlegungsschrift B60Q1/24 (2017) DE102017117044
- [26] Berlitz, S., Funk, C., Omerbegovic, S. u. Armbruster, T.: Informieren eines Verkehrsteilnehmers über eine autopilotgesteuerte Fahrt. Offenlegungsschrift B60Q9/00 (2014) DE102014011811
- [27] Moisel, J.: Method for visualizing a driving state. Offenlegungsschrift B60Q1/24 (2016) DE102016014709
- [28] Nabben Bartholomeus u. Han, B.: System and method for visual communication of an operational status. Patent B60Q1/34 (2016) US10053001
- [29] Fischer, E. u. Bae, H.: Systems and methods for automatically deploying road hazard indicators. Offenlegungsschrift B60Q1/46 (2018) US2018186283

- [30] Suzuki, D., Kinoshita, M., Yamazumi, T. u. Yamasaki, K.: Image Display Device. Offenlegungsschrift B60Q1/04 (2018) US2018257547
- [31] Fischer, S., Schreiber, P., Riedel Alf u. Sieler, M.: Array projector design for projection on arbitrarily curved surfaces
- [32] Michael Rosenauer: Webinar Projection Solutions. Osram Continental 2020
- [33] McMahan, G., Bolbocianu, L., Baruco, S. R. u. Jagdish, P.: Benutzeranzeige der Aktivierung eines angetriebenen Systems während berührungsloser menschlicher Aktivierung. Offenlegungsschrift B60R 25/01 (2017) DE102017215650
- [34] Hamm, M.: Safety Improvement by New Matrix and Turn Indicator Functionality. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting. [Darmstadt, September 23-25, 2013]. Darmstädter Lichttechnik, Bd. 15. München: Utz 2013
- [35] Mikrozensus: Körpermaße nach Altersgruppen und Geschlecht. Ergebnisse des Mikrozensus 2017 insgesamt, 2018
- [36] NCD Risk Factor Collaboration: A century of trends in adult human height. eLife 5 (2016)
- [37] Graphische Symbol- Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen. Erkennungsweiten und farb- und photometrische Anforderungen 4844-1
- [38] Hofer, M. u. Sorokin, L.: A new traffic participant and its language. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017.

- Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017
- [39] Spektrum - Lexikon der Optik: Auflösungsvermögen.  
<https://www.spektrum.de/lexikon/optik/aufloesungsvermoegen/257>
- [40] de Wille, M.: Mikros Scannerkonzepte für hochaufgelöste dynamische Umfeldprojektionen im Kfz. Ein Technologievergleich, Karlsruher Institut für Technologie Masterthesis. Karlsruhe 2017
- [41] Siegfried Kokoschka u. Karsten Klinger: Grundlagen der Lichttechnik
- [42] Pon, B.: Pavement Albedo, 2007
- [43] DIN 5034: Tageslicht in Innenräumen. Grundlagen
- [44] Seidelmann, P. K.: Explanatory supplement to the astronomical almanac. A revision to the Explanatory supplement to the astronomical ephemeris and the American ephemeris and nautical almanac. Mill Valley, Calif.: University Science Books 1992
- [45] Mini: MINI Excitement Paket, 2019.  
[https://www.mini.de/de\\_DE/home/accessories/mini-excitement-paket.html](https://www.mini.de/de_DE/home/accessories/mini-excitement-paket.html)
- [46] Land Rover: Konfigurator Range Rover Evoque, 2019.  
<https://www.landrover.de/vehicles/range-rover-evoque/se/index.html>
- [47] Wisotop: Von CIE XYZ zu xyz. CIE- Normfarbtafel, 2017.  
<https://wisotop.de/xyz-zur-cie-farbtafel.php>
- [48] Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be fitted



- and/or be used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions E/ECE/324/Rev.1/Add.47/Rev.12
- [49] Berlitz, S.: How Digitalization and Automated Driving will revolutionize Automotive Lighting. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017
- [50] Werner, A.: New Colours for Autonomous Driving: An Evaluation of Chromaticities for the External Lighting Equipment of Autonomous Vehicles. Colour Turn, Nr. 1 (2018): Colour Turn 2018 (2019)
- [51] Polin, D.: Flimmereffekte von pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung
- [52] Perz, M., Vogels, I., Sekulovski, D., Wang, L., Tu, Y. u. Heyndrick, I.: Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems 47, S. 281–300
- [53] Bremer, C., Lewerich, B. u. Neumann, C.: Technological and physiological evaluation of novel projection systems in automotive. In: Proceedings SIA Vision 2018
- [54] Straßenfahrzeuge- Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen. Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug 15008:2009
- [55] Sicherheit von Lasereinrichtungen 60825

- [56] Gerolf Kloppenburg: Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover Dissertation. Hannover 2017
- [57] Frederiksen, A., Fiess, R., Stork, W. u. Bogatscher, S.: Eye safety for scanning laser projection systems. In: Biomedizinische Technik
- [58] Laser Safety, Henderson, R. u. Schulmeister, K.
- [59] Buckley, E.: Eye safety analysis of current laser-based scanned-beam projection systems. In: Journal of the SID, S. 943–951
- [60] Buckley, E.: Eye safety analysis of current laser-based LCOS projection systems. In: Journal of the SID, S. 1051–1057
- [61] Brennesholtz, M. S. u. Stupp, E. H.: Projection displays. Wiley SID series in display technology. Chichester, U.K: J. Wiley and Sons 2008
- [62] Osram: OSOLON Compact CL CEUP.CE. Datasheet. Version 1.3
- [63] Jin-Jia, C., Te-Yuan, W., Kuang-Lung, H., Te-Shu, L., Ming-Da, T. u. Chin-Tang, L.: Freeform lens design for LED collimating illumination. Optics express (2012) 20, S. 10984–10995
- [64] BBS Bild- und Lichtsysteme GmbH/ Epson: HDTV Kit: LCD L3C07U-85G13. [https://www.bbs-bildsysteme.com/Projekt\\_EPSON\\_HDTV\\_L3C07U-85G13.pdf](https://www.bbs-bildsysteme.com/Projekt_EPSON_HDTV_L3C07U-85G13.pdf)
- [65] Haberlag, B. u. Lüttig, A. K.: Flüssigkristalle. Seminararbeit im Fach Physikalische Chemie zur Vorlesung Kolloid- und Grenzflächenchemie (2006)
- [66] Texas Instruments Incorporated: DMD Optical Efficiency for Visible Wavelengths. Application Report (2019)

- [67] Near-infrared ultrafast laser shaping using spatial light modulators, López, J. G., 2015
- [68] Syndiant: SYL2271 Product Brief. High Resolution LCOS Light Modulation Panel
- [69] Texas Instruments Inc: Laser Power Handling for DMDs (2012)
- [70] Texas Instruments Inc: DLP9500. Datasheet
- [71] Texas Instruments Inc: DLP5530-Q1 0.55-inch 1.3 Megapixel DMD for Automotive Interior Display
- [72] Texas Instruments Inc: DLP3030-Q1 0.3 WVGA S450 DMD (2018)
- [73] Texas Instruments Inc: DLP5531-Q1 0.55-inch 1.3 Megapixel DMD for Automotive Exterior Lighting 2018
- [74] Texas Instruments Inc: DLP3034-Q1 0.3 WVGA 405-nm DMD for Automotive Interior Display (2019)
- [75] Osram: Osram ermöglicht intelligentes Autolicht in HD-Qualität. Für die zweite Eviyos Generation arbeitet Osram an weltweit einzigartigem 25.600 Pixeln auf einem LED-Chip., 2019. <https://www.osram.de/os/press/press-releases/osram-enables-intelligent-automotive-lighting-in-hd-quality.jsp>
- [76] Osram: Die Hybrid-LED ermöglicht smartes Scheinwerferlicht mit über 1.000 einzeln ansteuerbaren Pixeln. Die Hybrid-LED ermöglicht smartes Scheinwerferlicht mit über 1.000 einzeln ansteuerbaren Pixeln, 2017. [https://www.osram.de/os/press/press-releases/eviyos\\_led\\_prototype\\_revolutionizes\\_smart\\_headlights.jsp](https://www.osram.de/os/press/press-releases/eviyos_led_prototype_revolutionizes_smart_headlights.jsp)
- [77] Heßke, A. u. Hülsenbusch, T.: Räumliche Charakterisierung von Laserstrahlung. Praktikumsanleitung für den Lehrversuch,

2009. <http://www.fb06.fh-muenchen.de/lhm/images/Praktikum/MasterPOM/praktikum%20m2.pdf>, abgerufen am: 09/19
- [78] Optics Balzers: LED ColorDichroics™
- [79] Holoeye: HED 7200 Color LCOS Microdisplay
- [80] BBS: Transmissive HTPS Panels. [https://www.bbs-bildsysteme.com/html/spatial\\_light\\_modulator.html](https://www.bbs-bildsysteme.com/html/spatial_light_modulator.html)
- [81] Shibaura electronics: Thermal Time Constant. [https://www.shibauraelectronics.com/products/technical/physical\\_04.html](https://www.shibauraelectronics.com/products/technical/physical_04.html)
- [82] Alutronic: PR146. Produkteigenschaften, 2021. <https://alutronic.de/de/products/standardprofile/pr-146/>, abgerufen am: 02/21
- [83] Ushio: Data Sheet HL63263DG. AlGaInP Laser Diode
- [84] Bielawny, A., Schupp, T. u. Neumann, C.: Automotive Lighting Continues to Evolve. *Optics and Photonics News* 27 (2016) 11, S. 36
- [85] Holoeye: LCoS Microdisplay Technologie. *Microdisplay Technologie* (2017)
- [86] Texas Instruments Inc: DLP230NP. Datasheet
- [87] Trommer, J., Feil, T., Weissenberger, D., Fiederling, R. u. Rayer, M.: New Possibilities with  $\mu$ AFS modules – The Path to High-Resolution Full-Matrix Headlamps. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17.* München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017
- [88] Neumann, V.: *Fokussierung und optische Abbildung in der Lasertechnik*

- [89] Niko Maximilian Lehmkuhl: Theoretisches Konzept eines Diodenlasers mit externem Resonator in Littrow-Konfiguration und Vermessung von Laserdioden für die Atom Trap Trace Analysis. Bachelorarbeit (2014)
- [90] Edmund Optics: 0,95mW 635nm VHK Laserdiode runder Strahl VIS
- [91] Edmund Optics: 0,6mW 635nm VLM™ Laserdiodenmodul
- [92] Holoeye: HED 2220. 0.39" HD Color LCOS Microdisplay
- [93] Edmund Optics: 10mm Wire Grid Polarizing Cube | Edmund Optics
- [94] Edmund Optics: Breitbandige polarisierende Strahlteilerwürfel. ID Produktfamilie #2986
- [95] Schott: Optisches Glas. Datenblätter, 2019
- [96] Texas Instruments Inc: DLP2010 .2 WVGA DMD
- [97] SYL2271. Product Brief, Syndiant, USA 2017
- [98] Schildmann, S. u. Rosenhahn, E.-O.: Next Generation of LED Light Sources: New Potentials for High Performance Low Beam Applications and miniaturized Designs. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017, S. 135–144
- [99] Osram Opto Semiconductors GmbH: KW CULNM1.TG. OSOLON® Boost HL. Datenblatt

- [100] UN: Regelung Nr. 48 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen
- [101] Osram: LCB CRBP. Datasheet. Version 1.7
- [102] Osram: OSTAR® Projection Compact KP CSLNM1.F1. Datasheet. Version 1.7
- [103] Osram: OSOLON® Signal LJ CKBP. Datasheet. Version 1.6
- [104] Bando, K.: New Generation LEDs and LD for Automotive lighting. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017, S. 379–387
- [105] Engl, M., Lenef, A., Pikart, P., Rosenauer, M., Zumkley, M., Frischeisen, J. u. Strauss, J.: Blue laser light conversion: a technology comparison between transmissive and reflective approaches. In: Khanh, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. ISAL 2017. Darmstädter Lichttechnik, Volume 17. München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017, S. 19–28
- [106] Hanafi, A. u. Erdl, H.: New High-brightness Laser-based White Light Source for Vehicular Lighting Systems. In: Photonics in Germany 2017
- [107] Nichia: NDS7175. Datasheet
- [108] Lasertack: NDG7K75T. Datasheet
- [109] Mitsubishi: ML562G84. Datasheet

- [110] Kohler, C.: Optimierung von Flüssigkristall-Lichtmodulatoren in aktiven optischen Systemen. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2009. Berichte aus dem Institut für Technische Optik, Nr. 62. Stuttgart: ITO 2009
- [111] Buntz, G.: Twisted Nematic Liquid Crystal Displays (TN-LCDs) an invention from Basel with global effects
- [112] Helfrich, W. u. Schadt, M.: Lichtsteuerzelle. Patentschrift 532261
- [113] Armitage, D., Underwood, I. u. Wu, S.-T.: Introduction to microdisplays. Chichester, England, Hoboken, NJ: Wiley 2010
- [114] Holoeye: HED 1316 Color LCOS Microdisplay
- [115] Hecht, E.: Optics. Reading, Mass.: Addison-Wesley 2002
- [116] Norland: Optical Adhesive 61
- [117] ProFlux: Wire-Grid Polarizing Beamsplitter Cube. Nanowire Technology, abgerufen am: 29.01.2019
- [118] Schuleman, M.: High Performance Vikuiti Optical Core Sheet.pdf
- [119] Präzisions Glas & optik: Transmission ITO auf 1,1 mm Floatglass. <https://www.pgo-online.com/de/kurven/pdfkurven/D/CEC020S40070011.pdf>, abgerufen am: 03.05.2019