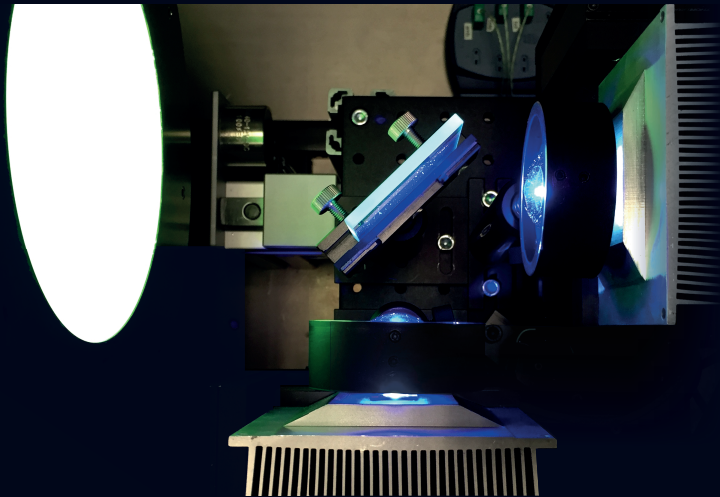


BAND 19 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

BENJAMIN SCHULZ

WEITERENTWICKLUNG DER BELEUCHTUNGSEINHEIT  
LED-BASIERTER PROJEKTIONSSYSTEME





Benjamin Schulz

**Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit  
LED-basierter Projektionssysteme**

Lichttechnisches Institut  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

# **Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit LED-basierter Projektionssysteme**

von  
Benjamin Schulz

Karlsruher Institut für Technologie  
Lichttechnisches Institut

Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit  
LED-basierter Projektionssysteme

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation  
von M.Eng. Benjamin Schulz geboren in Kyritz

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juni 2018  
Hauptreferent: Prof. Dr. Cornelius Neumann  
Korreferent: Prof. Dr. Wilhelm Stork

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152  
ISBN 978-3-7315-0865-6  
DOI 10.5445/KSP/1000087780

FÜR LISA





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	3
1.2	Zielsetzung .....	6
1.3	Abgrenzung.....	7
1.4	Aufbau der Arbeit.....	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1	Funktionsprinzip .....	9
2.2	Optischer Aufbau eines Digitalprojektors.....	11
2.3	Étendue, Strahl- und Leuchtdichte.....	13
2.4	Lichtstrom von Projektoren.....	16
<b>3</b>	<b>Stand der Technik – Beleuchtungseinheiten für DMD-Projektoren</b> .....	<b>17</b>
3.1	Technische Anforderungen .....	18
3.1.1	Étendue .....	18
3.1.2	Sequentielle Farbe und darstellbarer Farbraum.....	23
3.2	Spektralmodelle .....	25
3.2.1	Lichtquelle .....	25
3.2.2	Filter.....	26
3.3	Höchstdruckgasentladungslampe.....	27
3.4	Laser-Phosphor .....	34
3.5	Leuchtdiode (LED) .....	41
3.5.1	Höchstleistungs-LEDs.....	41
3.5.2	High Lumen Density (HLD) Konzept .....	48
3.6	Zusammenfassung .....	50

<b>4</b>	<b>Steigerung des Ausgangslichtstroms.....</b>	<b>53</b>
4.1	LED Light Recycling .....	53
4.1.1	Konzept.....	54
4.1.2	Simulationsmodell .....	57
4.1.3	Experimentelle Aufbauten .....	59
4.1.4	Messergebnisse .....	63
4.1.5	Diskussion .....	72
4.1.6	Fazit.....	76
4.1.7	Zusammenfassung .....	78
4.2	Erhöhung der Anregung der grünen Phosphor-LED .....	80
4.2.1	Konzept.....	80
4.2.2	Potenzielle Leuchtdichteerhöhung .....	82
4.2.3	Experiment .....	85
4.2.4	Messergebnisse .....	87
4.2.5	Diskussion .....	91
4.2.6	Zuverlässigkeit .....	93
4.2.7	Anwendungsbeispiel .....	96
4.2.8	Zusammenfassung .....	97
4.3	Ansätze für den roten Farbkanal.....	98
4.3.1	Besonderheiten der roten AlInGaP-LED.....	99
4.3.2	Roter Leuchtstoff .....	101
4.3.3	Erweiterung der Kühlung durch ein Peltiermodul.....	113
4.3.4	Erhöhung der Pulsfrequenz.....	123
4.4	Auswirkungen auf das Gesamtsystem.....	145
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick.....</b>	<b>151</b>

<b>A</b>	<b>Berechnungen</b> .....	<b>155</b>
A.1	Effektiver Lichtstrom des Konverter-LED- Modells.....	155
A.2	Berechnung des LED-Peltier-Modells.....	157
<b>B</b>	<b>Abkürzungen &amp; Symbole</b> .....	<b>159</b>
B.1	Abkürzungen .....	159
B.2	Symbole.....	160
	<b>Danksagung</b> .....	<b>163</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>165</b>

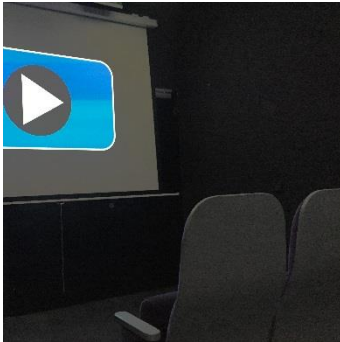


# Kapitel 1

## EINLEITUNG

Digitale Projektoren, die oftmals auch als Beamer bezeichnet werden, integrieren sich zunehmend in unseren medialen Alltag. Im Privaten wird durch sie das (Heim-) Kinoerlebnis ermöglicht (Abbildung 1.1 a) und im beruflichen Umfeld werden durch sie in Besprechungs- und Seminarräumen in Unternehmen und Bildungseinrichtungen Daten und Präsentationen wiedergegeben (Abbildung 1.1 b). Auf Reisen können mithilfe von leichten, mobilen, batteriebetriebenen Beamern digitale Inhalte wie Fotos und Videos von mehreren Personen gleichzeitig betrachtet werden (Abbildung 1.1 c). Auch die sogenannte erweiterte Realität (engl. augmented reality, AR), deren Umsetzung und Anwendung derzeit Gegenstand verschiedener aktueller Forschungsarbeiten ist [1,2], kann durch sehr kompakte Projektionseinheiten realisiert werden, die die digitalen Inhalte mit unserem natürlichen Sichtfeld überlagern (Abbildung 1.1 d) [3,4].

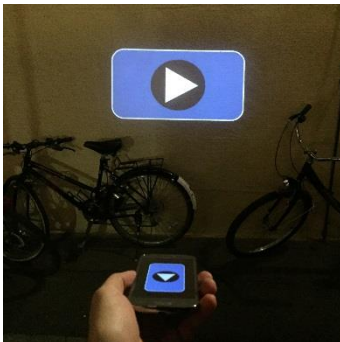
Darüber hinaus existieren zahlreiche Einsatzgebiete für Projektionsysteme, die von additiven Fertigungsverfahren (insbes. Stereolithografie) [5] bis hin zu Head-up Displays (HUDs) [6] und Frontscheinwerfern in Automobilen [7] reichen. Ermöglicht wurde die Vielzahl dieser Anwendungen durch die Verbesserungen und Innovationen in den Bereichen der Mikrodisplays, der optischen Komponenten und der Lichtquellen, die in den letzten zehn Jahren durch intensive Forschungs- und Entwicklungsaufwände erzielt wurden.



a) (Heim-) Kino



b) Besprechungsräume



c) Unterwegs



d) Erweiterte / virtuelle Realität

**Abbildung 1.1:** Darstellung verschiedener typischer Anwendungsgebiete von digitalen Video- und Datenprojektoren.

Anhand LED-basierter Projektoren lässt sich diese Entwicklung sehr deutlich aufzeigen. Während eines der ersten kommerziell erhältlichen Modelle aus dem Jahr 2006 lediglich einen Lichtstrom von 25 lm und eine Auflösung von 800x600 Pixeln (SVGA) aufwies [8], kann ein aktuelles High-End-LED-System mit einem Mikrodisplay etwa 1900 lm (BenQ X12000) und eine Auflösung von 3840x2160 Pixeln (4K) bereitstellen.

Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften konnte sich die LED-Technologie erfolgreich in einigen Projektionsanwendungen etablieren. Zu diesen Eigenschaften gehören die Wartungsfreiheit, die gesättigten Farben sowie das verzögerungsfreie Ein- und Ausschalten. Auch für die Hersteller von Projektoren bieten Leuchtdioden gegenüber anderen Lichtquellen, wie den Entladungslampen und den Lasern, signifikante Vorteile: Die lange Lebensdauer von mehreren zehntausend Stunden, die einfache Ansteuerung, der Verzicht auf bewegliche Bauteile wie Phosphor- und Filterräder, und die einfache Integration in das System machen sie zu einer technisch hervorragenden Lösung.

## 1.1 MOTIVATION

Die Verwendung von LEDs in Beamern mit erhöhten Helligkeitsanforderungen ist jedoch eine Herausforderung für die Projektor-Industrie. Die limitierte Leuchtdichte von LEDs hat in Projektionsystemen einen begrenzten Ausgangslichtstrom zur Folge. Dieser ist in einigen Anwendungsbereichen zu gering, um ein Bild in ausreichender Qualität zu erzeugen. Die Bildqualität wird wesentlich durch den Bildkontrast beeinflusst, der als der Quotient der Leuchtdichten eines weißen und eines schwarzen Bildbereichs definiert ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sowohl der weiße, als auch der schwarze Bereich von dem vorhandenen Umgebungslicht überlagert werden, wodurch der Kontrast negativ beeinflusst wird.

Für eine diffus reflektierende Wand lässt sich der Bildkontrast  $C_v$  schreiben als

$$C_v = \frac{L_{v,W} + L_{v,amb}}{L_{v,S} + L_{v,amb}} \approx \frac{E_{v,W} + E_{v,amb}}{E_{v,S} + E_{v,amb}} \quad (1.1)$$

wobei  $L_{v,W}$  die Leuchtdichte des weißen Bildbereichs,  $L_{v,S}$  die Leuchtdichte des schwarzen Bildbereichs und  $L_{v,amb}$  die Leuchtdichte, die durch das Umgebungslicht an der Projektionsfläche erzeugt wird, repräsentieren.  $E_{v,W}$ ,  $E_{v,S}$  und  $E_{v,amb}$  stellen die korrespondierenden Beleuchtungsstärken dar. Bezieht man den nativen Kontrast des Projektors

$$C_{v,P} = \frac{L_{v,P,W}}{L_{v,P,S}} = \frac{E_{v,P,W}}{E_{v,P,S}} \quad (1.2)$$

mit ein, der sich mit etwa 250:1 abschätzen lässt, kann der erforderliche Projektorlichtstrom  $\Phi_{v,P}$  in Abhängigkeit des Flächeninhalts des projizierten Bildes  $A_P$ , der Umgebungsbeleuchtungsstärke  $E_{v,amb}$  und des erforderlichen Kontrastverhältnisses  $C_v$  wie folgt berechnet werden:

$$\Phi_{v,P} = A_P E_{v,amb} \frac{C_v - 1}{1 - \frac{C_v}{C_{v,P}}} \quad (1.3)$$

Als Grundlage der Berechnung lassen sich zwei typische Anwendungsszenarien unterscheiden:

In Büro- und Besprechungsräumen („Office“) kommen typischerweise aufgabenorientierte Anwendungen zum Einsatz, für die ein Kontrastverhältnis von 3:1 genügt [9]. Das Bild sollte eine Diagonale

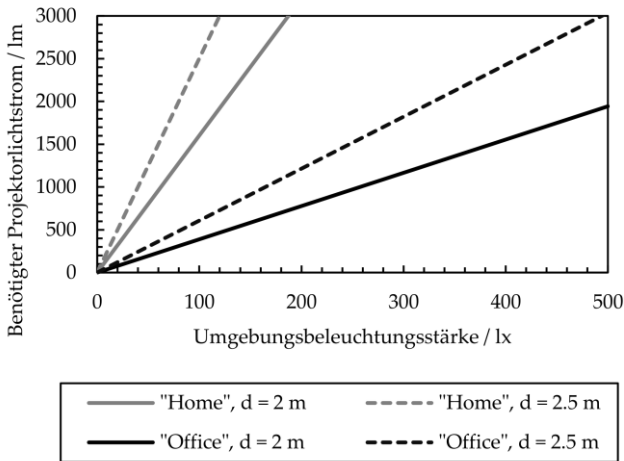


zwischen 2,0 und 2,5 Meter besitzen und ein Seitenverhältnis von 4:3 aufweisen.

Heimanwendungen („Home“), die üblicherweise Video- und Film-inhalte darstellen, sollten einen Kontrastwert von mindestens 10:1 erreichen [9]. Die Bildgröße sollte ebenso zwischen 2,0 und 2,5 Meter liegen, wobei hier ein schmaleres Seitenverhältnis von 16:9 bevorzugt wird.

Die erforderlichen Projektorlichtströme für die beiden Anwendungsszenarien sind in Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtungsstärke in Abbildung 1.2 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der Wert des erforderlichen Projektorlichtstroms in dem Szenario „Home“ aufgrund der höheren Kontrastanforderung deutlich steiler ansteigt als der Wert für das „Office“-Szenario. Hierbei sind die üblichen Umgebungsbeleuchtungsstärken der beiden Szenarien einzubeziehen. Während der Wert in Heimanwendungen circa 100 lx beträgt, kann dieser in Büro- und Besprechungsräumen im Bereich um 500 lx liegen.

Die beiden Szenarien ergeben jeweils erforderliche Projektorlichtströme von bis zu 3000 lm bei einer Bilddiagonale von 2,5 Meter. Ein Wert dieser Höhe ist derzeit mit LED-Technologie nur mit sehr großem technischen und finanziellen Aufwand, z.B. durch den Einsatz mehrerer großer Mikrodisplays, zu erreichen. Aus diesem Grund werden in diesen Anwendungen vorwiegend bewährte Entladungslampen zur Lichterzeugung eingesetzt.



**Abbildung 1.2:** Darstellung des benötigten Projektorlichtstroms in Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtungsstärke für die beiden Anwendungsszenarien „Office“ und „Home“ für Bild diagonalen von 2,0 und 2,5 m.

## 1.2 ZIELSETZUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Beleuchtungseinheit LED-basierter Projektoren systematisch weiterentwickelt und verbessert, mit dem Ziel eine praktikable Alternative zu konventionellen Entladungslampen zu schaffen. Der Fokus liegt hierbei auf der Erhöhung des Projektorlichtstroms.

Das Ziel soll durch die Verbesserung bestehender Technologien und das Aufzeigen neuer Konzepte erreicht werden. Dabei sollen sowohl die Einzelkomponenten als auch das Beleuchtungssystem als Ganzes berücksichtigt werden. Die Umsetzbarkeit der Ansätze soll zudem experimentell bestätigt werden. Das System soll darüber hinaus

dahingehend optimiert werden, dass der darstellbare Farbraum mindestens dem des etablierten Standards Rec.709 [10] entspricht.

## **1.3 ABGRENZUNG**

Diese Arbeit behandelt ausschließlich LED-Beleuchtungssysteme für Projektoren, die ein Mikrospiegelarray (engl. digital micromirror device, im Folgenden mit DMD abgekürzt) mit einer Diagonalen von bis zu 0,7" zur Bilderzeugung verwenden. DMDs besitzen aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, wie der Unempfindlichkeit gegenüber der Polarisation des eingestrahnten Lichts und den akzeptablen Kosten, das größte Anwendungspotential in Kombination mit LEDs.

Auf Möglichkeiten der Anwendung mit anderen Technologien, wie Flüssigkristall-basierten Displays (engl. liquid-crystal display, LCD und liquid-crystal-on-silicon, LCoS) und Systemen mit mehreren Mikrodisplays, wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen, jedoch werden diese nicht im Detail ausgeführt. Die Betrachtungen werden weiterhin auf diffus reflektierende Projektionsflächen ohne Verstärkung beschränkt, da diese am häufigsten verwendet werden.

## **1.4 AUFBAU DER ARBEIT**

In Kapitel 2 werden zunächst die Funktionsweise und der grundlegende Aufbau eines digitalen Projektors erläutert und die physikalischen Größen aufgezeigt, die im System von Bedeutung sind.

In Kapitel 3 werden dann die Anforderungen an das Beleuchtungssystem des Projektors dargelegt und die Ersatzmodelle vorgestellt, die für die Analyse verschiedener Beleuchtungseinheiten benötigt werden. Daraufhin wird der aktuelle Stand der Technik von Beleuchtungseinheiten digitaler Projektoren aufgezeigt. Hierbei werden die Eigenschaften verschiedener geeigneter Lichtquellen aufgeführt und die entsprechenden Beleuchtungseinheiten vorgestellt. Zu den Lichtquellen gehören die Höchstdruck-Gasentladungslampe, der Halbleiterlaser und die Leuchtdiode.

Im darauf folgenden Kapitel 4 werden Methoden und Konzepte beschrieben, die den Ausgangslichtstrom von LED-basierten Projektoren erhöhen sollen. An dieser Stelle werden sowohl Konzepte gezeigt, die Modifikationen am Gehäuse der LEDs vorschlagen (Abschnitt 4.1), als auch Methoden, die innerhalb des Beleuchtungssystems Anwendung finden (Abschnitt 4.2). Zusätzlich werden Methoden aufgezeigt, die sich explizit mit der Verbesserung des Lichtstroms des roten Farbkanals beschäftigen (Abschnitt 4.3). Am Ende dieses Kapitels werden die möglichen Auswirkungen der Einzelkonzepte auf den Lichtstrom des Gesamtsystems betrachtet.

Im letzten Kapitel 5 werden die Ergebnisse dieser Arbeit nochmals zusammengefasst und es wird ein Ausblick in die Zukunft der LED-Projektoren gegeben.

## Kapitel 2

# GRUNDLAGEN

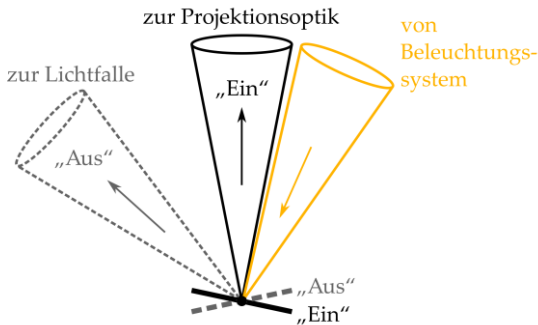
In diesem Kapitel werden die Grundlagen von digitalen Projektoren erläutert. Das Funktionsprinzip von Mikrodisplay-basierten Projektoren wird aufgezeigt und deren optischer Aufbau dargelegt. Zudem wird auf die physikalischen Größen eingegangen, die die Ausgangsleistung eines Projektors begrenzen. Außerdem werden die Unterschiede in der Messung von Lichtquellen und Projektoren aufgezeigt.

### 2.1 FUNKTIONSPRINZIP

Die Bilderzeugung erfolgt bei der Vielzahl von Digitalprojektoren mithilfe von Mikrodisplays, die mittels einer Projektionsoptik vergrößert auf einem Schirm abgebildet werden [9]. Eingesetzt werden Mikrospiegelarrays, transmissive Flüssigkristall-Displays (LCD) oder reflektive Flüssigkristall-Displays (LCoS). Diese werden von einem Beleuchtungssystem bestrahlt und wirken auf das eingestrahlte Licht wie eine zweidimensionale Anordnung orts aufgelöster Lichtschalt-elemente. Das auf einen Pixel eingestrahlte Licht wird während des „Ein“-Zustands in die Projektionsoptik gelenkt, im „Aus“-Zustand wird es daran gehindert.

DMDs bestehen aus Millionen individuell adressierbarer, reflektierender Spiegel, die ihre Orientierung durch das Anlegen einer

Steuerspannung verändern können [11]. Die Ausrichtung der Spiegel wird entweder durch eine einachsige Kippbewegung [12] oder durch eine Kombination einer Dreh- und Kippbewegung (Tilt-and-Roll-Pixel, TRP) [13] verändert. Die beiden Endpositionen der Spiegel realisieren jeweils zwei unterschiedliche Reflexionswinkel für ein einfallendes Strahlenbündel. Während des „Ein“-Zustands wird es in die Projektionslinse reflektiert, während des „Aus“-Zustands wird es in Richtung einer Lichtfalle gelenkt. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht. Die DMD-Technologie und die entsprechenden Treiberbausteine werden ausschließlich von der Firma Texas Instruments unter dem Markennamen DLP („digital light processing“) angeboten.



**Abbildung 2.1:** Funktionsprinzip eines DMD-Pixels.

Vollfarbbilder werden gemäß der additiven Farbmischung durch die Überlagerung dreier monochromatischer Bilder der Primärfarben Rot, Grün und Blau erzeugt (siehe Abbildung 2.2). Während diese Teilbilder bei der Verwendung dreier unabhängiger Displays zeitlich parallel erfolgen kann, müssen diese bei der Verwendung eines

einzelnen Displays nacheinander dargestellt werden. Diese sogenannte farbsequenzielle Darstellung (engl. color-sequential oder color-field-sequential) nutzt die Trägheit des menschlichen Farbsehens. Werden alle drei Teilbilder innerhalb eines Zeitbereichs dargestellt, der kleiner als  $1/(60 \text{ Hz})$  ist, so können sie nicht mehr individuell unterschieden werden und die Einzelfarben addieren sich [14].



**Abbildung 2.2:** Zusammensetzung eines mehrfarbigen Bildes durch die Überlagerung dreier monochromatischer Bilder der Primärfarben Rot, Grün und Blau.

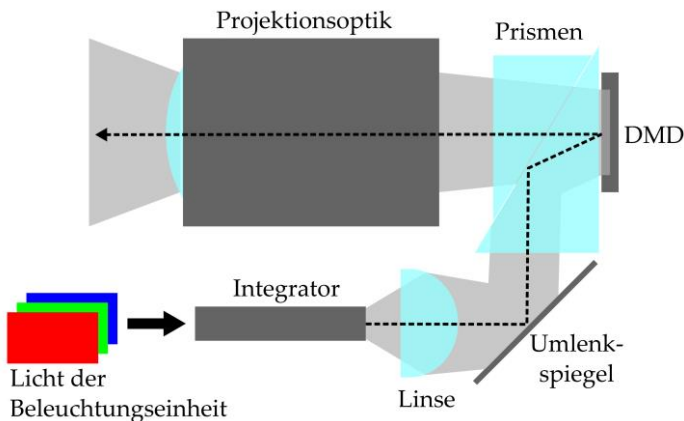
Die Beleuchtung des Mikrodisplays übernimmt eine entsprechende Beleuchtungseinheit und passende Strahlformungselemente. Dieses Teilsystem hat die Aufgabe, die Strahlung in der geforderten Qualität (z.B. Wellenlänge, Homogenität, Étendue), Quantität (Lichtstrom bzw. Strahlungsleistung) und der entsprechenden zeitlichen Abfolge bereitzustellen.

## 2.2 OPTISCHER AUFBAU EINES DIGITALPROJEKTORS

Das Licht am Ausgang einer Beleuchtungseinheit weist in den meisten Fällen unerwünschte Inhomogenitäten auf. Zum Homogenisieren der Strahlung werden häufig sogenannte Integratoren oder Mikrolin-

senarrays verwendet [9]. Das durchmischte Licht wird über eine Anordnung von unterschiedlichen Linsen umgeformt, um das Display, seiner Fläche und seinem Akzeptanzwinkel entsprechend, vollständig zu beleuchten. Zusätzlich können Umlenkspiegel zum Einsatz kommen, die den Strahlengang anpassen, beispielsweise um den erforderlichen Bauraum zu reduzieren.

Das von einem DMD in Richtung der Projektionslinse reflektierte Licht muss vom einfallenden Licht separiert werden. Dazu können Umlenkspiegel oder TIR-Prismen verwendet werden [15]. Diese werden so ausgelegt und entworfen, dass sie das Licht von Seiten der Beleuchtungseinheit im entsprechenden Winkel auf die Mikrospiegel lenken. Das austretende Licht wird gemäß seinem Reflexionswinkel in die Richtung der Projektionslinse oder der Lichtfalle umgelenkt. Eine mögliche Topologie einer Beleuchtungsoptik für einen DMD ist in Abbildung 2.3 gezeigt.



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung einer Beleuchtungsoptik eines DMD-Projektors.



Das Mikrodisplay wird mittels der Projektionsoptik auf einen Schirm abgebildet. Die Größe der Optik richtet sich vorrangig nach dem erforderlichen Akzeptanzwinkel und der Eingangsapertur, die benötigt wird, um einen möglichst großen Anteil des vom Mikrodisplay kommenden Lichtstroms aufzunehmen. Als Kenngröße wird hierbei oft die sogenannte  $f$ -Zahl verwendet [16]. Sie ist definiert als Quotient der eingangsseitigen Brennweite  $f$  und der Eingangsapertur  $D$ :

$$f\# = \frac{f}{D} = \frac{1}{2 \tan \alpha} \quad (2.1)$$

Eine schematische Darstellung dieser Größen zeigt Abbildung 2.4.

Der innere Aufbau eines Projektionsobjektivs beinhaltet eine komplexe Anordnung von optischen Elementen, beispielsweise Achromatenpaare zur Korrektur der chromatischen Aberration.

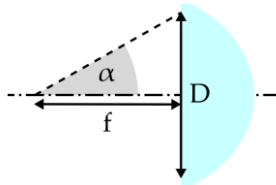


Abbildung 2.4: Darstellung der Teilgrößen der  $f$ -Zahl einer Linse.

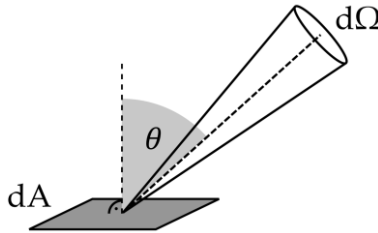
## 2.3 ÉTENDUE, STRAHL- UND LEUCHTDICHTE

Projektoren sind sogenannte Étendue-limitierte Systeme. Ihr Ausgangslichtstrom ist durch das optische Element begrenzt, das die kleinste Étendue besitzt. Die Étendue ist eine physikalische Erhal-

tungsgröße, die sich als das Produkt der beobachteten Fläche  $dA \cos \theta$  und dem entsprechenden Raumwinkel eines optischen Elements  $d\Omega$  ausdrücken lässt [17]:

$$d^2\varepsilon = n^2 dA \cos \theta d\Omega \quad (2.2)$$

Diese Größe wird auch als Lichtleitwert oder geometrischer Fluss bezeichnet [18]. Das umgebende Medium wird durch dessen quadrierten Brechungsindex  $n^2$  berücksichtigt. Abbildung 2.5 veranschaulicht den Zusammenhang der geometrischen Größen.



**Abbildung 2.5:** Darstellung der geometrischen Zusammenhänge der Étendue.

In Projektionsanwendungen besitzen typischerweise die Mikrodisplays die kleinste Étendue. Beim Dimensionieren der Lichtquelle muss dies berücksichtigt werden, da eine Lichtquelle größerer Étendue nur einen Teil ihrer Leistung auf das Ziel übertragen kann. Im Idealfall sollte also gelten:

$$\varepsilon_{Quelle} \leq \varepsilon_{Ziel} \quad (2.3)$$

In einem passiven optischen System bleibt die Étendue einer Lichtquelle bestenfalls erhalten, sie kann jedoch durch Aberrationen zunehmen. Eine Abnahme der Étendue ist ohne entsprechende

Verluste nicht möglich. Verschiedene Herleitungen und Erklärungen dieser Gesetzmäßigkeit, beispielweise aus thermodynamischer Sicht, werden in [17] dargestellt.

Aufgrund der Étendue-Limitierung ist es nicht möglich, den Ausgangslichtstrom eines Projektors simpel durch eine größere Lichtquelle zu erhöhen. Für eine derartige Anwendung muss eine Lichtquelle eine möglichst hohe Strahlungsleistung innerhalb einer bestimmten Étendue emittieren. Diese Kenngröße wird als Strahldichte  $L$  bezeichnet:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos \theta d\Omega} = \frac{d\Phi}{d\varepsilon} \quad (2.4)$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Empfindlichkeit des menschlichen Auges durch die wellenlängenabhängige Funktion  $V(\lambda)$  und das photometrische Strahlungsäquivalent  $K_v = 683 \text{ lm/W}$  erhält man aus der Strahlungsleistung den Lichtstrom der Quelle:

$$\Phi_v = K_v \int \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

und die Leuchtdichte der Lichtquelle:

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA \cos \theta d\Omega} = \frac{d\Phi_v}{d\varepsilon} \quad (2.6)$$

Können die Werte der Strahl- bzw. Leuchtdichte einer Lichtquelle erhöht werden, kann ebenfalls die Ausgangsleistung des entsprechenden Projektionssystems gesteigert werden.

## 2.4 LICHTSTROM VON PROJEKTOREN

Der emittierte Lichtstrom einer Lichtquelle wird über den gesamten Winkelraum ( $\Omega = 4\pi$ ) bestimmt. Für ebene Oberflächenemitter, zu denen viele LEDs gehören, ist das Integral über den Halbraum ( $\Omega = 2\pi$ ) hinreichend, wenn sie keine Emission nach hinten aufweisen [19]. Der emittierte Lichtstrom einer Lichtquelle kann beispielsweise mithilfe einer sogenannten Ulbrichtkugel bestimmt werden. Die Messung des Lichtstroms von Projektoren erfolgt jedoch auf eine andere Weise, weshalb die beiden Größen zu unterscheiden sind.

Die Messung des Projektorlichtstroms wird üblicherweise nach EN 61947-1 [20] durchgeführt. Die Angabe der Ausgangsleistung erfolgt durch den Lichtstrom  $\Phi_{v,P}$  in der Einheit Lumen (lm). Diese Größe wird durch die Messung der Beleuchtungsstärken  $E_{v,P}$  eines vollständig weißen Testbilds an neun Messpunkten ermittelt. Das arithmetische Mittel der neun Beleuchtungsstärken wird mit der beleuchteten Fläche  $A_P$  multipliziert, um den Lichtstrom zu erhalten:

$$\Phi_{v,P} = \overline{E_{v,P}} A_P \quad (2.7)$$

Bei der Angabe des Lichtstroms von Projektoren ist zudem der Weißfarbort anzugeben, der in der Mitte des Bildes zu bestimmen ist.

## Kapitel 3

# STAND DER TECHNIK – BELEUCHTUNGSEINHEITEN FÜR DMD-PROJEKTOREN

In diesem Kapitel wird auf die spezifischen Anforderungen des Systems an die Beleuchtungseinheit von Projektoren eingegangen, die einen DMD zur Bildformung verwenden. Es werden außerdem Ersatzmodelle dargelegt, die eine Analyse der verschiedenen Beleuchtungssysteme ermöglichen sollen. Es werden Lichtquellen und Technologien vorgestellt, die die identifizierten Anforderungen potentiell erfüllen können. Hierzu gehören Systeme, die Entladungslampen, Laser kombiniert mit Leuchtstoffen (Laser-Phosphor) oder LEDs zur Lichterzeugung verwenden. Hybride, die Kombinationen mehrerer dieser Technologien verwenden, werden hier nicht ausgeführt.

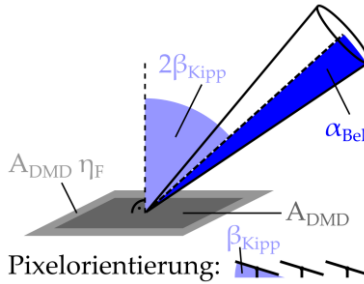
## 3.1 TECHNISCHE ANFORDERUNGEN

### 3.1.1 ÉTENDUE

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, sollte die Étendue der Lichtquelle kleiner oder gleich der Étendue des DMDs sein, um den übertragbaren Lichtstrom zu maximieren. Um die nutzbare Étendue der Lichtquelle zu bestimmen, wird der Wert des DMDs berechnet. Die Étendue eines DMDs im Medium Luft ( $n \approx 1$ ) lässt sich folgendermaßen berechnen [21]:

$$\varepsilon_{DMD} = \pi A_{DMD} (1 + \eta_F) \sin^2 \alpha_{Bel} \cos(2\beta_{Kipp}) \quad (3.1)$$

$A_{DMD}$  ist hierbei die aktive Fläche des DMDs, die sich aus dem Produkt des Flächeninhalts eines Pixels und der Anzahl der Pixel ergibt.  $\eta_F$  bezeichnet einen Überfüllfaktor, der gewährleistet, dass sich die Randbereiche, in denen die Beleuchtungsstärke stark abfällt, nicht auf der aktiven Fläche des DMDs befinden [9]. Der Überfüllfaktor sollte zu diesem Zweck einen Wert von 10...20 % annehmen [21].  $\alpha_{Bel}$  beschreibt den halben Beleuchtungswinkel und  $\beta_{Kipp}$  den Kippwinkel der Spiegel. Die beschriebene Geometrie ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

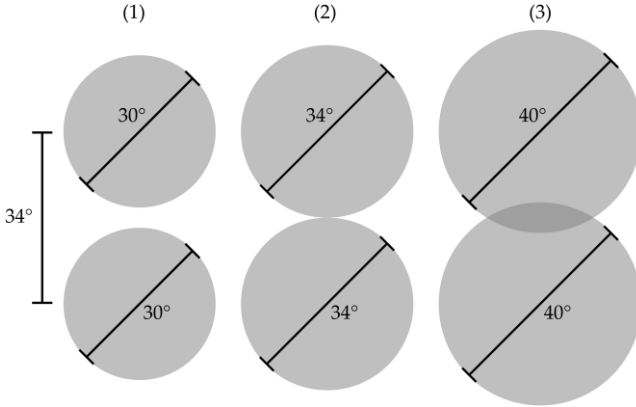


**Abbildung 3.1:** Geometrische Zusammenhänge für die Berechnung der DMD-Étendue.

Eine Überlappung der ein- und austretenden Strahlenbündel sollte vermieden werden, da der Projektorkontrast hiervon negativ beeinflusst wird. Bei einem Überschneiden der Bündel besteht die Möglichkeit, dass Licht aus dem Beleuchtungspfad direkt in die Projektionslinse gelangt, ohne dass es kontrolliert vom DMD reflektiert wurde. In einigen Fällen kann ein Überlapp durch eine entsprechende Apertur verhindert werden, um den Schnittbereich zu maskieren. Da diese Methode jedoch nur begrenzt und nicht für alle DMD-Typen funktioniert, wird ein maximaler halber Beleuchtungswinkel  $\alpha_{Bel,max}$  definiert. Dieser wird durch den Kippwinkel des DMDs festgelegt. Für diesen gilt:

$$\alpha_{Bel,max} \leq \beta_{Kipp} \quad (3.2)$$

Die Lage der Strahlenbündel kann durch sogenannte Pupillendiagramme veranschaulicht werden. Drei Diagramme dieser Art sind in Abbildung 3.2 für einen DMD mit einem Kippwinkel von  $\pm 17^\circ$  für verschiedene Beleuchtungswinkel gezeigt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass sich die Pupillen bei Überschreiten des Kippwinkels überschneiden.



**Abbildung 3.2:** Pupillendiagramme der ein- und austretenden Strahlenbündel bei einem Kippwinkel von  $\pm 17^\circ$  und einem Beleuchtungswinkel von  $30^\circ$  (1),  $34^\circ$  (2) und  $40^\circ$  (3).

Die oben gezeigte Berechnung der Étendue des DMDs berücksichtigt die Fläche des DMDs, nicht jedoch dessen Form. Aus diesem Grund wird folgend ebenso die zweidimensionale Étendue berücksichtigt. Mit ihrer Hilfe können die Ausdehnungen des DMDs in  $x$ - und  $y$ -Richtung unabhängig voneinander betrachtet werden.

Die zweidimensionale Étendue berechnet sich allgemein wie folgt [17]:

$$d\varepsilon_{2D} = n \, da \, \cos \theta \, d\theta \quad (3.3)$$

Aus dieser Formel können die beiden Werte für einen DMD folgendermaßen berechnet werden [21]:

$$\varepsilon_{2D,DMD,x} = 2 N_x a_x \sqrt{1 + \delta_F} \sin \alpha_{Bel,x} \cos(2\beta_{Kipp,x}) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{2D,DMD,y} = 2 N_y a_y \sqrt{1 + \delta_F} \sin \alpha_{Bel,y} \cos(2\beta_{Kipp,y}) \quad (3.5)$$

Die Bedeutungen der hier verwendeten Formelzeichen können Tabelle 3.1 entnommen werden.



**Tabelle 3.1:** Beschreibung der Formelzeichen der Berechnung der 2D-Étendue eines DMDs.

Formelzeichen	Beschreibung
$N_x, N_y$	Anzahl der Pixel in x-/y-Richtung
$a_x, a_y$	Länge eines Pixels in x-/y-Richtung
$\delta_F$	Überfüllfaktor der aktiven Fläche
$\alpha_{Bel,x}, \alpha_{Bel,y}$	Halber Beleuchtungswinkel in x-/y-Ebene
$\beta_{Kipp,x}, \beta_{Kipp,y}$	DMD-Kippwinkel in x-/y-Ebene

Bei der Anwendung der Formeln ist zu beachten, dass die Abhängigkeit vom Kippwinkel von der Beleuchtungsrichtung des DMDs abhängt. Beispielsweise tritt der Faktor bei einer Beleuchtung entlang der y-Richtung (welche als Bottom-Illumination bezeichnet wird) nur in der y-Achse auf, nicht jedoch in der x-Achse.

Die Eigenschaften und die berechneten Étendue-Werte aktueller DMD-Modelle von Texas Instruments sind in **Tabelle 3.2** aufgelistet. Hierbei werden nur DMDs berücksichtigt, die eine Pixelzahl von mindestens 1920x1080 aufweisen. DMDs mit größerer aktiver Fläche sind hier ebenfalls ausgeschlossen, da sich deren Anwendung aufgrund ihrer hohen Kosten auf professionelle Anwendungen beschränkt.

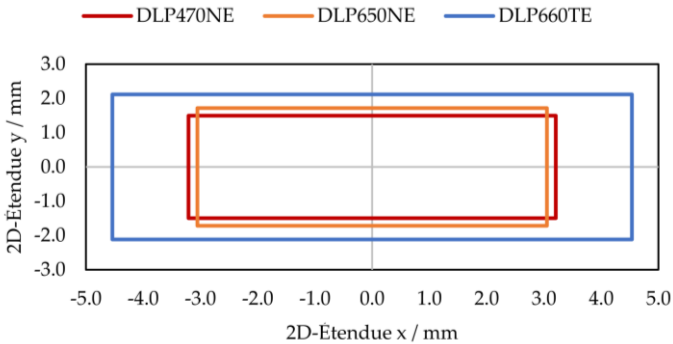
Eine anschauliche Darstellung liefert die Auftragung der beiden zweidimensionalen Étendue-Größen gegeneinander. Ein solches Diagramm ist in **Abbildung 3.3** dargestellt, welches die Étendues der in **Tabelle 3.2** aufgeführten DMDs zeigt. Liegt die Étendue einer Lichtquelle innerhalb der aufgespannten Fläche, kann theoretisch der gesamte Lichtstrom an das Mikrodisplay übertragen werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Étendue der Lichtquelle auf dem

optischen Pfad zum DMD nicht durch die optischen Komponenten oder deren Anordnung vergrößert wird.

**Tabelle 3.2:** Eigenschaften drei verschiedener DMDs der Firma Texas Instruments [12,13,21,22].

<b>Bezeichnung</b>	<b>DLP470NE</b>	<b>DLP650NE</b>	<b>DLP660TE</b>
Diagonale	0,47" (11,9 mm)	0,65" (16,7 mm)	0,66" (16,8 mm)
Auflösung	1920 x 1080	1920 x 1080	2716 x 1528
Pixelraster	5,4 µm	7,56 µm	5,4 µm
Art des Pixels	TRP	Diagonal	TRP
Überfüllfaktor	12 %	12 %	12 %
Empfohlener Beleuchtungs- ursprung	Unten (Bottom)	Ecke (Corner)	Unten (Bottom)
Kippwinkel	± 17°	± 12°	± 17°
Étendue	15,1 mm <sup>2</sup> sr	16,5 mm <sup>2</sup> sr	30,2 mm <sup>2</sup> sr
2D-Étendue x	6,4 mm	6,1 mm	9,1 mm
2D-Étendue y	3,0 mm	3,4 mm	4,2 mm

Bei den berechneten Werten handelt es sich um Maximalwerte, bei denen die Kippwinkel vollständig ausgenutzt werden und sich somit die ein- und austretenden Strahlenbündel in der Beleuchtungsachse eben noch nicht überlappen (vgl. Bild 2 in Abbildung 3.2). Es wird zudem vorausgesetzt, dass eine Projektionslinse mit ausreichend großem Akzeptanzwinkel eingesetzt wird. Wird eine Projektionslinse mit größerer f-Zahl, d.h. kleinerem Akzeptanzwinkel, verwendet, ergibt sich ein weiterer limitierender Faktor, der die System-Étendue verringert.



**Abbildung 3.3:** Diagramm der 2D-Étendues verschiedener aktueller DMDs.

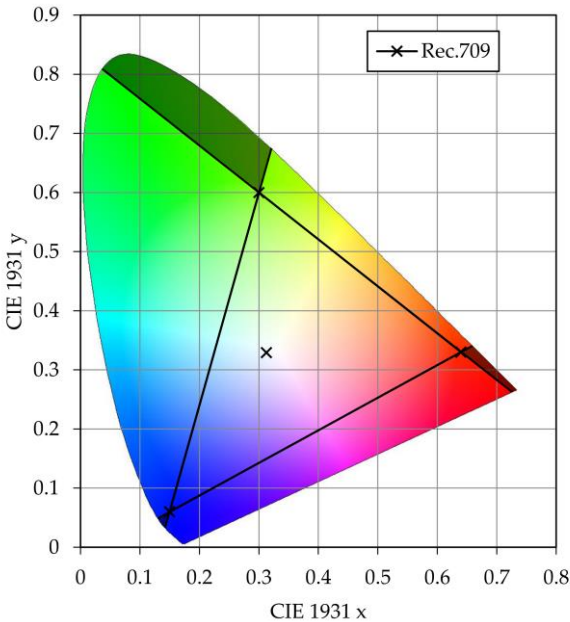
### 3.1.2 SEQUENTIELLE FARBE UND DARSTELLBARER FARBRAUM

Die Beleuchtungseinheit muss das Licht sequenziell durch die Primärfarben Rot, Grün und Blau bereitstellen. Hierfür muss die Strahlung auf einem gemeinsamen optischen Pfad liegen. Die Primärfarben sollen mit ihren Farbkoordinaten ein Dreieck aufspannen, das dem des etablierten Standards Rec.709 entspricht oder dieses enthält. Diese Bedingung ist dann sicher erfüllt, wenn die Farborte der Primärfarben außerhalb des Zieldreiecks liegen und sie sich innerhalb der verlängerten Geraden des Dreiecks befinden.

Das Farbdreieck und der Weißfarbort des Rec.709 Standards sind in Abbildung 3.4 gezeigt. Das aufgespannte Dreieck umschließt die Gesamtheit der darstellbaren Farben, welche auch als Gamut bezeichnet wird [23]. Die Bereiche der Primärfarben, die benötigt werden, um den Rec.709 Standard zu erreichen, sind dunkel hinterlegt dargestellt.

Die Farborte der Primärfarben sowie des Weißpunkts des Standards sind in  $x$ - und  $y$ -Koordinaten nach CIE 1931 in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Die Erzeugung und Verwendung zusätzlicher Sekundärfarben (Gelb, Magenta und Cyan) wird im Folgenden nicht explizit behandelt. Sekundärfarben erhöhen zwar den Lichtstrom im Weißpunkt [24], verringern jedoch in farbsequenziellen Systemen gleichzeitig die Lichtströme der Primärfarben, da deren Zeitanteile verringert werden müssen.



**Abbildung 3.4:** Primärfarben und Weißfarbort des Rec.709-Standards dargestellt im CIE 1931 Farbdigramm.

**Tabelle 3.3:** Farbkoordinaten (nach CIE 1931) der Primärfarben und des Weißfarborts des Rec.709 Standardfarbraums [10].

	CIE 1931 x	CIE 1931 y	CCT
Rot	0,6400	0,3300	
Grün	0,3000	0,6000	
Blau	0,1500	0,0600	
Weiß	0,3127	0,3290	6500 K

## 3.2 SPEKTRALMODELLE

Neben der Étendue der Lichtquelle ist ihre spektrale Verteilung für die Abschätzung des Verhaltens im System wichtig. Für die Evaluation, Bewertung und Verbesserung der verschiedenen Beleuchtungseinheiten werden Spektralmodelle verwendet. Auf diese Weise können die Einflüsse von verschiedenen wellenlängenabhängigen Filtern auf die Strahlung verschiedener Lichtquellen analytisch ermittelt werden. Spektralfilter sind in vielen Projektionssystemen für eine korrekte Funktion erforderlich und tragen zur Erzeugung der Primärfarben bei.

### 3.2.1 LICHTQUELLE

In der vorliegenden Arbeit werden die spektralen Verteilungen der Lichtquelle  $S(\lambda)$  durch entsprechende Messungen, beispielsweise mithilfe eines Spektrometers, bestimmt. Für einige Untersuchungen kann es erforderlich sein, die spektrale Verteilung der Lichtquelle zu verändern, zum Beispiel hinsichtlich ihrer Lage oder Breite. Hierzu kann das Spektrum der Lichtquelle zunächst durch eine Funktion

angenähert werden. Halbleiterlichtquellen lassen sich sehr gut mit folgenden Formel annähern [25]:

$$S(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda) = \frac{1}{1 + k_1} \left( e^{-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{(\Delta\lambda)^2}} + k_1 e^{-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{(\Delta\lambda)^2} k_2} \right) \quad (3.6)$$

$$\Delta\lambda = \begin{cases} \Delta\lambda_1, & (\lambda < \lambda_0) \\ \Delta\lambda_2, & (\lambda \geq \lambda_0) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$k_i = \begin{cases} k_i^1, & (\lambda < \lambda_0) \\ k_i^2, & (\lambda \geq \lambda_0) \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (3.8)$$

$\lambda$  stellt hier die Wellenlänge,  $\lambda_0$  die Spitzenwellenlänge und  $\Delta\lambda$  die Halbwertsbreite des Spektrums dar. Da die Verteilung asymmetrisch sein kann, werden die beiden Seiten links und rechts der Spitzenwellenlänge separat bestimmt.  $k$  bestimmt hier einen Parameter, der die Steilheit der Kurve beeinflusst.

Die Parameter sind so zu bestimmen, dass eine Messkurve hinreichend angenähert wird. In dieser Arbeit wird hierfür die Methode der minimalen Fehlerquadrate der spektralen Strahlungsleistung verwendet. Durch die Überlagerung mehrerer derartiger Spektren können auch andere Lichtquellen, wie beispielsweise Leuchtstoffe, sehr gut angenähert werden. Nach dem Anpassen an ein gemessenes Spektrum kann dessen Lage, Breite und Form sehr einfach durch die Variation der entsprechenden Parameter verändert werden.

### 3.2.2 FILTER

In Beleuchtungseinheiten von Projektionssystemen werden zur Farbfilterung ausschließlich Interferenzfilter geringer Absorption

verwendet, da Absorptionsfilter aufgrund der hohen Strahldichten, die innerhalb des Systems auftreten, nicht geeignet sind. Die Transmission dieser Filter kann in Abhängigkeit der Wellenlänge mithilfe der folgenden Funktion angenähert werden [26]:

$$T(\lambda, \lambda_{1/2}, \gamma) = (1 - T_0) - \frac{1 - 2T_0}{1 + \exp\left(\frac{-\lambda + \lambda_{1/2}}{\gamma}\right)} \quad (3.9)$$

$T_0$  beschreibt die Transmission im entsprechenden Wellenlängenbereich,  $\lambda$  die Wellenlänge und  $\lambda_{1/2}$  die Wellenlänge, bei der die Transmission des Filters den Wert 0,5 annimmt (im Folgenden auch als Filterkante bezeichnet).  $\gamma$  ist ein Parameter, der die Steilheit der Funktion im Bereich der Filterkante bestimmt. Dieser wird für die Untersuchungen auf einen konstanten Wert von 3 gesetzt, wodurch eine realisierbare Filtersteilheit erreicht wird.

Die Funktion kann beispielsweise verwendet werden, um einen Filter oder eine Filterkombinationen zu bestimmen, die nach Multiplikation mit dem Lichtquellenspektrum zu einem definierten Zielfarbbort führt.

### 3.3 HÖCHSTDRUCKGASENTLADUNGSLAMPE

Etwa 70 % der im Jahr 2017 verkauften Projektoren verwenden Höchstdruck-Gasentladungslampen als Lichtquellen [27]. Während High-End-Systeme wie Kino-Projektoren auf Xenon-Lampen als Lichtquelle setzen, werden in den meisten lampenbasierten Projektoren Quecksilber-Höchstdruckgasentladungslampen verwendet [9]. Die Strahlung wird bei diesen zwischen zwei Elektroden in einem

Quecksilbergas durch einen kurzen Entladungsbogen von wenigen Millimetern Länge erzeugt. Eine derartige Kurzbogenlampe mit Reflektor ist in Abbildung 3.5 dargestellt.



**Abbildung 3.5:** Höchstdruck-Gasentladungslampe mit Reflektor.

Der Leuchtkörper kann durch einen Zylinder modelliert werden, dessen gekrümmte Mantelfläche die Leuchtfläche bildet. Die Länge  $L$  und der Durchmesser  $D$  des Entladungsbogens bestimmen die Étendue der Lichtquelle:

$$\varepsilon_{Bogen} = \pi^2 DL \quad (3.10)$$

Bei einer typischen Länge von 1,5 mm und einem Durchmesser von 1 mm ergibt sich folglich ein Wert von 14,8 mm<sup>2</sup> sr, welcher innerhalb der gleichen Größenordnung liegt, wie die in

Bei der Anwendung der Formeln ist zu beachten, dass die Abhängigkeit vom Kippwinkel von der Beleuchtungsrichtung des DMDs abhängt. Beispielsweise tritt der Faktor bei einer Beleuchtung entlang der y-Richtung (welche als Bottom-Illumination bezeichnet wird) nur in der y-Achse auf, nicht jedoch in der x-Achse.



Die Eigenschaften und die berechneten Étendue-Werte aktueller DMD-Modelle von Texas Instruments sind in Tabelle 3.2 **aufgelistet. Hierbei werden** nur DMDs berücksichtigt, die eine Pixelzahl von mindestens 1920x1080 aufweisen. DMDs mit größerer aktiver Fläche sind hier ebenfalls ausgeschlossen, da sich deren Anwendung aufgrund ihrer hohen Kosten auf professionelle Anwendungen beschränkt.

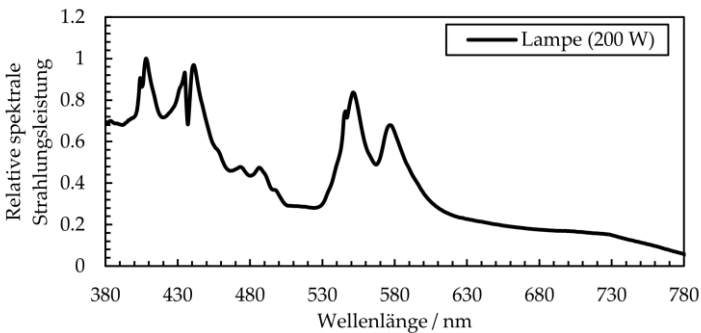
Eine anschauliche Darstellung liefert die Auftragung der beiden zweidimensionalen Étendue-Größen gegeneinander. Ein solches Diagramm ist in Abbildung 3.3 dargestellt, welches die Étendues der in Tabelle 3.2 aufgeführten DMDs zeigt. Liegt die Étendue einer Lichtquelle innerhalb der aufgespannten Fläche, kann theoretisch der gesamte Lichtstrom an das Mikrodisplay übertragen werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Étendue der Lichtquelle auf dem optischen Pfad zum DMD nicht durch die optischen Komponenten oder deren Anordnung vergrößert wird.

Tabelle 3.2 aufgeführten DMDs. Daraus lässt sich ableiten, dass sich Kurzbogenlampen grundsätzlich für Projektionsanwendungen eignen.

Die Lampen werden fast ausschließlich in Kombination mit einem Reflektor verwendet. Dieser beeinflusst die Étendue: Zum einen kann der Reflektor nur den Lichtstrom eines bestimmten Winkelbereichs aufnehmen, wodurch sich die Étendue reduziert. Zum anderen kann die Étendue zunehmen, beispielsweise durch Aberrationen am Reflektor [28]. Weiterhin sind die geometrischen Unterschiede in Vergleich zum Mikrodisplay zu beachten. Die Kombination aus Lampe und Reflektor erzeugt ein kreisrundes Leuchtbild, der DMD besitzt dagegen eine Rechteckform. Bei der Auslegung einer Beleuchtungs-

einheit mit derartigen Leuchtmitteln sind diese Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Das typische Spektrum einer Quecksilber-Höchstdruck-Gasentladungslampe für Projektionsanwendungen ist in Abbildung 3.6 gezeigt. Durch einen hohen Quecksilber-Gasdruck während des Betriebs kann ein kontinuierliches Spektrum generiert werden [29].



**Abbildung 3.6:** Relative spektrale Verteilung einer Quecksilber-Gasentladungslampe mit einer Anschlussleistung von 200 W.

Die Erzeugung der Primärfarben geschieht durch ein Farbfilterrad, das verschiedene Farbfilter in einer kreisförmigen Anordnung aufweist. Eine Fotografie eines solchen Farbfilterrads ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

Durch die Rotation des Rades werden die entsprechenden Primärfarben sequenziell aus dem kontinuierlichen Spektrum herausgefiltert. Mehrere Segmente der gleichen Farbe können verwendet werden, um die Farbwechselfrequenz zu erhöhen ohne die Rotationsgeschwindigkeit

keit des Farbfilterrads anzuheben. Durch die Steigerung der Frequenz kann der sogenannte Regenbogeneffekt reduziert werden [30].



Abbildung 3.7: RGBRGB-Farbfilterrad.

Um ein bestimmtes Gamut zu realisieren, müssen die Filter eine passende Transmissionscharakteristik aufweisen. Durch schrittweise Annäherung kann ein Filtersatz bestimmt werden, der das Lampenspektrum jeweils soweit trimmt, dass der Rec.709-Farbraum erreicht werden kann. Die ermittelten Filterkurven, die diese Anforderung für das in Abbildung 3.6 dargestellte Spektrum erfüllen, sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Der Weißfarbort kann durch verschieden große Farbfilteranteile auf dem Rad eingestellt werden.

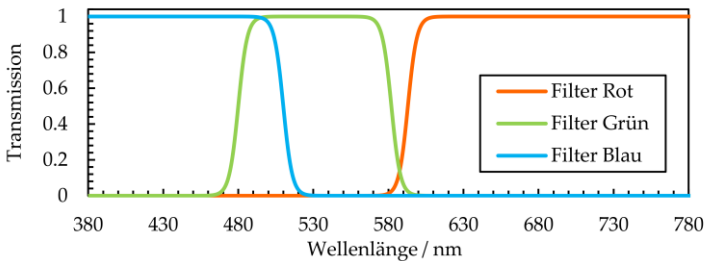


Abbildung 3.8: Filterkurven zur Erzeugung der Primärfarben in einem Lampen-System.

Die resultierenden Farbkoordinaten und die benötigten Farbfilteranteile für das gezeigte Spektrum sind in Tabelle 3.4 aufgezeigt. Die Verhältnisse der Lichtströme der Primärfarben zum Gesamtlichtstrom

$$\eta_{\text{Filter,R/G/B}} = \frac{\Phi_{v,R/G/B}}{\Phi_{v,ges}} \quad (3.11)$$

sind ebenso angegeben. Durch Multiplikation mit den jeweiligen Farbfilteranteilen ergeben sich die nutzbaren Lichtstromanteile des Lampenspektrums für die Primärfarben. Die Summe dieser drei Werte entspricht dem Anteil des sequenziell erzeugten weißen Lichts am gesamten Lichtstrom der Quelle.

**Tabelle 3.4:** Resultierende Farbkoordinaten, Farbfiltereffizienzen und Farbanteile bei Anwendung des in Abbildung 3.6 gezeigten Spektrums und der in Abbildung 3.8 dargestellten Filterkurven.

	Rot	Grün	Blau	Weiß
CIE 1931 x	0,6606	0,2980	0,1447	0,3127
CIE 1931 y	0,3391	0,6024	0,0556	0,3290
Farbfiltereffizienz (Transmission)	14 %	73 %	10 %	
Farbanteil	48 %	30 %	22 %	
Nutzbarer Lichtstrom- anteil für Rec.709	6,7 %	22 %	2,2 %	<b>31 %</b>

Anhand der niedrigen Transmissionsgrade der Primärfarben, die für den Rec.709 Standard benötigt werden, zeigt sich einer der Nachteile der Technologie. Die Notwendigkeit eines rotierenden Farbfilterrads hat zur Folge, dass ein Großteil des erzeugten Lichts herausgefiltert

werden muss und nicht mehr im System genutzt werden kann. Würde hier die Lampe im kontinuierlichen Betrieb beispielsweise einen Lichtstrom von 8000 lm erzeugen, würde der Lichtstrom des farbselektierten weißen Lichts nach den Filtern lediglich knapp 2500 lm betragen. In dieser Betrachtung werden Zeitbereiche, in denen die Zonen zwischen zwei Filtersegmenten bestrahlt werden, nicht berücksichtigt.

Eine andere Schwäche der Lichtquelle ist ihr für das System ungünstige Alterungsverhalten. Mit steigender Betriebsdauer nimmt die Länge des Entladungsbogens durch die Abnutzung der Elektroden zu. Hierbei bleibt zwar die erzeugte Strahlungsleistung nahezu konstant, jedoch steigt die Étendue an und die an das System übertragene Strahlungsleistung sinkt ab [9]. Typische Nutzungsdauern von Projektionslampen liegen im Bereich von lediglich 4000 Stunden.

Trotz weiterer nachteiliger Eigenschaften, wie beispielsweise der Verwendung von für den Menschen giftigem Quecksilber und der Aufwärmzeit, ist die Kombination aus Höchstdruckgasentladungslampe und Farbfilterrad die bis heute am meisten verwendete Beleuchtungstechnologie in Projektoren. Dies ist vor allem durch ihre technologische Ausgereiftheit, ihre Flexibilität durch die einfache Modifizierbarkeit der Farbfilter, die geringen Kosten und die hohe Verfügbarkeit zu begründen.

### 3.4 LASER-PHOSPHOR

Sogenannte Laser-Phosphor-Systeme besitzen eine oder mehrere Halbleiter-Laserdioden, die monochromatisches Licht aus dem nahen ultravioletten oder dem blauen Spektralbereich emittieren. Deren kurzwellige Strahlung wird durch bestimmte Leuchtstoffe (engl. phosphor) in breitbandiges Licht längerer Wellenlänge umgewandelt.

Die Étendue eines Laser-Phosphor-Beleuchtungssystems wird maßgeblich durch die eingesetzten Laserdioden und den Leuchtstoff definiert. Die Laserdioden selbst besitzen eine sehr kleine Étendue, die sich mithilfe der Größe der Austrittsapertur und der Ausgangsdivergenz annähern lässt. Allgemein können die Étenduewerte für eine ebene Emissionsfläche wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_{2D,x} = 2x \sin(\theta_x) \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{2D,y} = 2y \sin(\theta_y) \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\pi}{4} \varepsilon_{2D,x} \varepsilon_{2D,y} \quad (3.14)$$

Die Austrittsapertur und -divergenz sowie die daraus berechneten Étendue-Werte einer blauen Laserdiode sind in Tabelle 3.5 aufgelistet.

Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Étendue-Werte mehrere Größenordnungen kleiner sind als die eines Mikrodисplays. Daher ist eine Verwendung einer Vielzahl von Laserdioden innerhalb eines Projektionssystems problemlos möglich.

**Tabelle 3.5:** Ausgangsapertur und -divergenz einer typischen blauen Multimode-Laserdiode [31,32] und berechnete Étendue-Werte.

<b>Blaue Laserdiode</b>	
Ausgangsapertur (x, y)	200 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$
Ausgangsdivergenz ( $\theta_x, \theta_y$ )	7°, 23°
Étendue	150 $\cdot 10^{-6}$ mm <sup>2</sup> sr
2D-Étendue x	48,7 $\cdot 10^{-3}$ mm
2D-Étendue y	3,91 $\cdot 10^{-3}$ mm

Die Verwendung eines Leuchtstoffs führt zu einer erheblichen Vergrößerung der Étendue. Die Konversionsmaterialien emittieren näherungsweise isotrop in den gesamten Raum. Aus diesem Grund werden sie auf einen reflektierenden Träger aufgebracht, um die Abstrahlung auf den Halbraum zu reduzieren [33]. Des Weiteren kann die vom Laser beleuchtete Fläche nicht beliebig klein gewählt werden. Durch die limitierte Quanteneffizienz und die Stokes Verschiebung entsteht Wärme, die an die Umgebung abgeführt werden muss. Je kleiner die Fläche des Laserspots ist, desto höher liegt die lokale Temperatur des Konversionsmaterials. Das Überschreiten einer materialabhängigen Grenztemperatur führt zu einem Rückgang der Quanteneffizienz [34] und kann im schlimmsten Fall die Zerstörung der Struktur zur Folge haben [35]. Infolgedessen hängt die minimale Leuchtfläche vorwiegend von der Leistungsfähigkeit der Kühlung des Phosphors ab. Das Aufbringen des Leuchtstoffs auf ein rotierendes Rad trägt dazu bei, die Abwärme auf eine größere Fläche zu verteilen, ohne die effektive Leuchtfläche zu vergrößern.

Bei entsprechendem Design ist eine ausreichend kleine Leuchtfläche realisierbar, sodass die Étendue der Lichtquelle unterhalb der des Mikrodisplays liegt. Auch ist eine geometrische Anpassung der Leuchtquelle möglich, beispielsweise durch passende optische Elemente oder eine entsprechende Anordnung mehrerer Laserdioden.

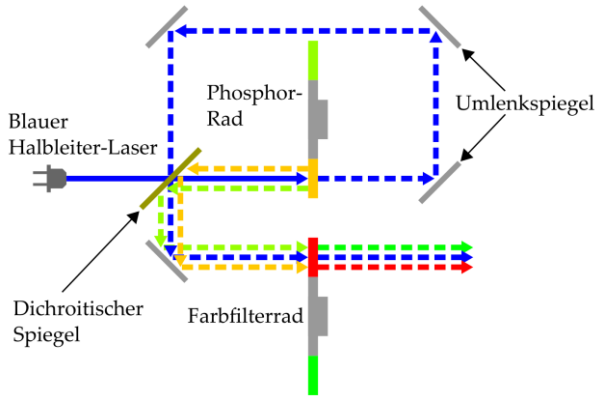
Für die Erzeugung sequenzieller Farben werden verschiedene Leuchtstoffe auf einem rotierenden Rad verwendet. Blaues Licht wird direkt vom Laser bereitgestellt und wird durch ein transparentes Segment auf dem Phosphorrad geführt. Ein dichroitischer Spiegel wird benötigt, um einen gemeinsamen optischen Pfad zu realisieren. Dieser besitzt eine wellenlängenabhängige Transmissions- und Reflexionscharakteristik, wobei die Summe des wellenlängenabhängigen Transmissions- und Reflexionsgrads näherungsweise 1 ergibt:

$$T(\lambda) + R(\lambda) \approx 1 \quad (3.15)$$

Durch einen passenden dichroitischen Spiegel können die Strahlungen des Lasers und des Phosphors getrennt bzw. zusammengeführt werden.

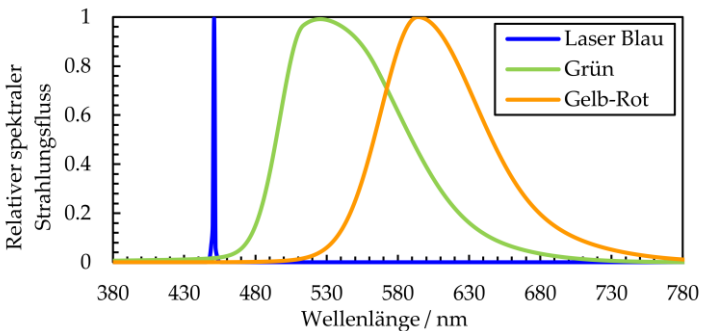
Eine mögliche Umsetzung des optischen Pfades eines Laser-Phosphor-Systems ist in der folgenden Abbildung 3.9 dargestellt. Der blaue Halbleiterlaser wird kontinuierlich betrieben. Der dichroitische Spiegel ist durchlässig für das kurzwellige blaue Licht des Lasers und reflektiert das langwellige Licht der Leuchtstoffe. Die optischen Elemente zur Strahlformung sind hier nicht dargestellt.





**Abbildung 3.9:** Schematische Darstellung eines möglichen optischen Pfades einer Laser-Phosphor-Beleuchtungseinheit.

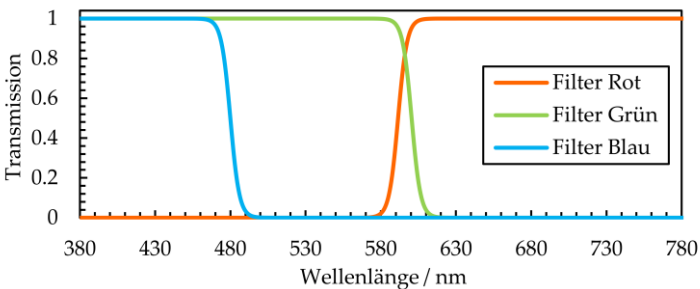
Typische spektrale Verteilungen eines blauen Halbleiterlasers mit einer Spitzenwellenlänge von 451 nm, eines grünen und eines gelb-roten Leuchtstoffs für Laser-Phosphor-Anwendungen sind in Abbildung 3.10 dargestellt.



**Abbildung 3.10:** Spektrale Verteilungen eines grünen und eines gelb-roten Leuchtstoffs für Laser-Phosphor-Anwendungen.

Aufgrund der spektralen Breite der Leuchtstoffe müssen zusätzlich Farbfilter verwendet werden, um gesättigte Primärfarben zu erzeugen. Hierzu können durch schrittweise Annäherung ebenfalls idealisierte Transmissionscharakteristika bestimmt werden, die die Spektren der Phosphore verengen. Die ermittelten Transmissionskurven eines möglichen Filtersatzes für die gezeigten Phosphorspektren sind in Abbildung 3.11 abgebildet. Die hellblaue Kurve zeigt hierbei die Transmission des dichroitischen Spiegels.

Eine vollständige Abdeckung des Rec.709 Farbraums ist jedoch bei der Laser-Wellenlänge von 451 nm nicht realisierbar. Hierzu könnte jedoch ein Laser mit einer Spitzwellenlänge in einen Bereich zwischen 461 und 467 nm eingesetzt werden. Auch die Verwendung eines blauen Leuchtstoffs wäre an dieser Stelle möglich [36].



**Abbildung 3.11:** Filterkurven zur Erzeugung der Primärfarben in einem Laser-Phosphor-System.

Die Berechnung der benötigten Farbanteile für den Ziel-Weißpunkt erfolgt unter der Voraussetzung, dass die Strahlungsleistungen der Leuchtstoffe der Strahlungsleistung des Lasers multipliziert mit einer Konversionseffizienz  $\eta_{Konv}$  entsprechen:

$$\Phi_{e,Phosphor} = \Phi_{e,Laser} \eta_{Konv} \quad (3.16)$$

Die Konversionseffizienz setzt sich zusammen aus der Quanteneffizienz  $\eta_{QE}$ , einem Faktor  $\eta_T$ , der thermisches Quenching abbildet, und einem Faktor  $\eta_{Stokes}$ , der die Energiedifferenz der aus- und eintretenden Photonen aufgrund der Stokes-Verschiebung berücksichtigt:

$$\eta_{Konv} = \eta_{QE} \eta_T \eta_{Stokes} \quad (3.17)$$

Die Ergebnisse der Berechnung der Primärfarben sind in Tabelle 3.6 aufgelistet. Hierin sind zudem die verwendeten Berechnungsparameter der Quanteneffizienzen [37] und des thermischen Quenching [38] sowie die Stokes Faktoren aufgeführt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass sich die Farbfiltereffizienz des roten Farbkanals sehr niedrig ausfällt. Dies ist auf die spektrale Breite und Lage des gelb-roten Leuchtstoffs zurückzuführen. Leuchtstoffe, die in einem längeren Wellenlängenbereich emittieren, existieren, leiden jedoch unter der größeren Stokes-Verschiebung und weisen ein stärkeres thermisches Quenching auf [39]. Deshalb finden sie in Laser-Phosphor-Systemen kaum Anwendung. Der Wert der Farbfiltereffizienz des grünen Leuchtstoffs fällt dagegen trotz der spektralen Breite sehr hoch aus. Somit wird nur ein geringer des erzeugten Lichtstroms weggefiltert.

**Tabelle 3.6:** Verwendete Konversionsparameter und resultierende Farbkoordinaten, Farbfiltereffizienzen und -anteile bei Anwendung der in Abbildung 3.10 gezeigten Spektren und der in Abbildung 3.11 dargestellten Filterkurven.

	<b>Rot</b>	<b>Grün</b>	<b>Blau</b>	<b>Weiß</b>
Quanteneffizienz $\eta_{QE}$	0,90	0,90		
Quenching $\eta_T$	0,90	0,90		
Stokes $\eta_{Stokes}$	0,73	0,82		
CIE 1931 x	0,6599	0,3065	0,1558	0,3127
CIE 1931 y	0,3398	0,6273	0,0185	0,3290
Farbfiltereffizienz (Transmission)	43 %	94 %	100 %	
Farbanteil	39 %	47 %	15 %	
Nutzbarer Lichtstrom- anteil für Rec.709	17 %	44 %	15 %	<b>76 %</b>

Insgesamt ist der nutzbare Lichtstromanteil des Laser-Phosphor-Systems (76 %) deutlich höher als der des Lampen-basierte Systems (31 %). Folglich kann das erzeugte Licht deutlich effizienter genutzt werden. Positive Eigenschaften sind weiterhin die deutlich längere Lebensdauer von circa 20000 Stunden und die Möglichkeit der flexiblen Étendueanpassung.

Nachteilig ist vor allem die ineffiziente Erzeugung von rotem Licht. Hierbei spielen die Stokes Verschiebung, die Quanteneffizienz und die spektrale Breite des Leuchtstoffs eine entscheidende Rolle. Des Weiteren treten Schwierigkeiten beim Erreichen des Rec.709-Farbraums auf, da die Wellenlänge, die zum Anregen des Leuchtstoffs verwendet wird, gleichzeitig für die Erzeugung der blauen Primärfarbe eingesetzt wird.

## 3.5 LEUCHTDIODE (LED)

### 3.5.1 HÖCHSTLEISTUNGS-LEDs

Im Vergleich zu den anderen beiden Systemen werden die Primärfarben in LED-basierten Projektoren unabhängig voneinander erzeugt. Hier emittieren eine rote, eine grüne und eine blaue Höchstleistungs-LED schmalbandiges Licht, welches mithilfe von passenden dichroitischen Spiegeln überlagert wird. Bei LEDs für Projektionsanwendungen emittieren die Halbleiterchips direkt in das Medium Luft, um die Étendue zu minimieren. Eine solche LED lässt sich in sehr guter Näherung durch einen ebenen Oberflächenemitter modellieren, der in den gesamten Halbraum strahlt. Die Étendue hängt somit nur von der Emissionsfläche  $A_{LED}$  ab:

$$\varepsilon_{LED} = \pi A_{LED} \quad (3.18)$$

Die zweidimensionalen Étendue-Werte bestimmen sich durch die Breite  $x_{LED}$  bzw. die Höhe  $y_{LED}$  der Leuchtfläche:

$$\varepsilon_{2D,x} = 2 x_{LED} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{2D,y} = 2 y_{LED} \quad (3.20)$$

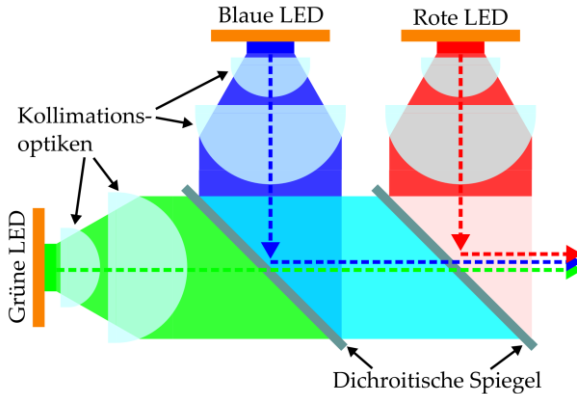
Tabelle 3.7 zeigt die Maße und die Werte der Étendue von drei LED-Typen, die in Projektoren verwendet werden. Deren Leuchtfläche wird aus zwei, vier oder sechs 2 mm<sup>2</sup> großen LED-Chips gebildet, die sehr eng aneinander platziert werden.

**Tabelle 3.7:** Typische Maße der Emissionsflächen von LEDs für Projektionsanwendungen und ihre korrespondierenden Étenduewerte [40–42].

	LE x P1W	LE x P2W	LE x P3W 01
Breite	2,6 mm	3,2 mm	4,8 mm
Höhe	1,5 mm	2,6 mm	2,6 mm
Étendue	12,3 mm <sup>2</sup> sr	26,1 mm <sup>2</sup> sr	39,2 mm <sup>2</sup> sr
2D-Étendue x	5,2 mm	6,4 mm	9,6 mm
2D-Étendue y	3,0 mm	5,2 mm	5,2 mm

Aus den Werten lässt sich erkennen, dass nur die LED mit der kleinsten Fläche theoretisch ihre gesamte Strahlungsleistung auf die DMDs übertragen kann. Die Werte der größeren LEDs sind zwar in der gleichen Größenordnung, überschreiten aber die Werte der DMDs in mindestens einer Dimension.

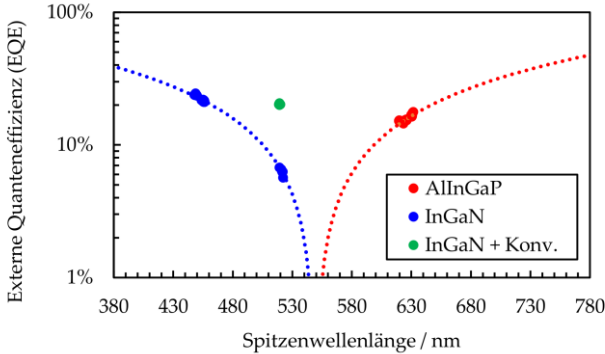
Die Realisierung eines gemeinsamen optischen Pfades erfolgt durch passende dichroitische Spiegel. Da deren wellenlängenabhängige Filtercharakteristik stark vom Einstrahlwinkel abhängt [9], muss die Strahlung der LEDs zunächst kollimiert werden. Dieses Parallelisieren der Strahlen erfolgt durch entsprechende optische Elemente, z.B. eine Linsenordnung oder eine parabolische Lichtsammellinse (engl. compound parabolic concentrator, CPC). Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 3.12 schematisch dargestellt. Es existieren zahlreiche andere Topologien für LED-Projektoren, jedoch wird diese bevorzugt verwendet, wenn der größtmögliche Lichtstrom erreicht werden soll.



**Abbildung 3.12:** Schematische Darstellung einer Beleuchtungseinheit mit LEDs und dichroitischen Spiegeln.

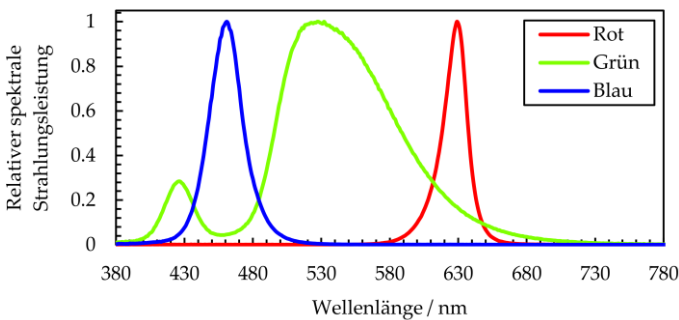
Direkt-emittierende Halbleiter besitzen eine geringe Effizienz im grünen Wellenlängenbereich (520 bis 560 nm). Häufig wird diese Effizienzlücke als „Green Gap“ bezeichnet. Aus diesem Grund werden in Projektionsanwendungen vorwiegend kurzwellige blaue LEDs verwendet, die mit einem temperaturstabilen Leuchtstoff-Keramik-Plättchen versehen werden. Diese besteht gewöhnlich aus einem Cer-dotierten Granat [33], zum Beispiel einem Lutetium-Aluminium-Granat (LuAG:Ce). Dieser Leuchtstoff ist sehr ähnlich zu den Leuchtstoffen, die in Laser-Phosphor-Systemen verwendet werden und wandelt das blaue Licht der LED, deren Spitzenwellenlänge etwa bei 448 nm liegt, nahezu vollständig in breitbandiges grünes Licht um. Bei hohen Stromdichten liegt die externe Quanteneffizienz der Konverter-LED mit 20 % deutlich höher als der Wert von 7 % bei einem direkten Emittor bei derselben Spitzwellenlänge. Dies ist in Abbildung 3.13 visualisiert. Hier sind die externen Quanteneffizienzen von Höchstleis-

tungs-LEDs aufgezeigt, die bei einer Stromdichte von  $3 \text{ A/mm}^2$  bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen wurden.



**Abbildung 3.13:** Externe Quanteneffizienz von InGaN- und AlInGaP-LEDs in Abhängigkeit der Spitzenwellenlänge bei einer Stromdichte von  $3 \text{ A/mm}^2$  und einer Temperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Abbildung 3.14 zeigt die spektralen Verteilungen einer roten, einer grünen und einer blauen LED für Projektionsanwendungen.

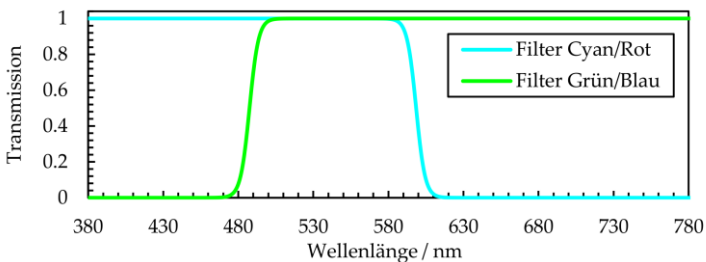


**Abbildung 3.14:** Spektrale Verteilungen einer roten, grünen und blauen LED für Projektionsanwendungen.



Die konversionsbasierte LED besitzt eine spektrale Breite von 93 nm, während die direkten Emittoren eine Breite von 28 nm (blau) und 19 nm (rot) aufweisen. Der kurzwellige Anteil des grünen Spektrums ist durch die Strahlung der blauen LED unterhalb des Leuchtstoffs zu begründen, die das Konverter-Plättchen transmittiert ohne mit einem Leuchtstoffpartikel wirksam zu interagieren.

Die bereits im System vorhandenen dichroitischen Spiegel können dazu eingesetzt werden, den kurzwelligen Anteil des grünen Spektrums herauszufiltern und die spektrale Breite zu verringern, um die Sättigung der grünen Primärfarbe zu erhöhen. Bei der Auslegung muss berücksichtigt werden, dass die Filter ebenso die beiden anderen Farben beeinflussen. Bei passender Wahl der Filter ist das Erreichen des Rec.709-Farbraum ohne weiteres möglich. Die Transmissionskurven eines Filtersatzes, der die Anforderungen erfüllt, sind in Abbildung 3.15 gegeben. Die gezeigten Transmissionskurven sind für eine Anordnung der LEDs wie in Abbildung 3.12 und für spektrale Verteilungen wie in Abbildung 3.14 gültig.



**Abbildung 3.15:** Transmissionskurven eines dichroitischen Filtersatzes eines LED-Projektors bei einer LED-Anordnung wie in Abbildung 3.12 gezeigt.

Die Farbsequenzen werden durch aufeinander folgende Pulse der LEDs erzeugt. Die Frequenz und die Tastverhältnisse (engl. duty cycle) der einzelnen LEDs werden durch einen geeigneten Treiber vorgegeben. Sehr verbreitet sind Pulsfrequenzen von 240 Hz. Die Frequenzen werden üblicherweise als ein ganzzahliges Vielfaches der gängigen Bildfrequenz von 60 Hz ausgeführt.

Die für den geforderten Weißpunkt nötigen Farbanteile werden mithilfe der Tastverhältnisse umgesetzt. Die LEDs werden nur dann aktiviert, wenn die entsprechende Farbe benötigt wird. Für die Ermittlung der individuellen Tastverhältnisse sind neben den Spektralinformationen die Verhältnisse der Strahlungsleistungen der drei Farbkanäle zueinander erforderlich. Diese Verhältnisse werden unter Anwendungsbedingungen bestimmt, bei denen die LEDs mit maximaler Stromdichte von bis zu vier A/mm<sup>2</sup> und bei einer Kühlkörpertemperatur zwischen 40 und 80 °C im Pulsmodus betrieben werden. Die Verhältnisse der Strahlungsleistungen eines Satzes aktueller LEDs, die die spektralen Verteilungen von Abbildung 3.14 aufweisen und die bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C bei maximaler Stromdichte betrieben wurden, sind in der folgenden Tabelle 3.8 aufgezeigt. Hier sind außerdem die Farbkoordinaten nach den Filtern, die Farbfiltereffizienzen der drei LEDs und der resultierende nutzbare Lichtstromanteil angegeben.

**Tabelle 3.8:** Verhältnisse der Strahlungsleistungen, resultierende Farbkoordinaten, Farbfiltereffizienzen und -anteile bei Anwendung der in Abbildung 3.14 gezeigten Spektren und der in Abbildung 3.15 dargestellten Filterkurven.

	<b>Rot</b>	<b>Grün</b>	<b>Blau</b>	<b>Weiß</b>
Verhältnisse der Strahlungsleistungen	1	1,33	1,5	
CIE 1931 x	0,6958	0,3077	0,1428	0,3127
CIE 1931 y	0,3041	0,6364	0,0364	0,3290
Farbfiltereffizienz	90 %	92 %	77 %	
Farbanteil / Tastgrad	29 %	47 %	24 %	
Nutzbarer Lichtstromanteil für Rec.709	26 %	43 %	18 %	<b>87 %</b>

Die Daten der Tabelle zeigen einen großer Vorteil der LED gegenüber den anderen vorgestellten Technologien: Aufgrund der direkten Erzeugung der Primärfarben ergeben sich sehr hohe Farbfiltereffizienzen, die einen hohen nutzbaren Lichtstromanteil von 87 % zur Folge haben. Die hohen Werte sind dadurch begründet, dass zum einen lediglich die spektralen Anteile erzeugt werden, die im System benötigt werden. Zum anderen wird die Strahlung der benötigten Primärfarbe ausschließlich in dem Zeitraum erzeugt, in dem sie erforderlich ist. Da es sich hierbei wie beim Laser-Phosphor-System um eine Halbleiter-Lösung handelt, sind die weiteren vorteilhaften Eigenschaften sehr ähnlich. Beispielsweise kann ebenfalls eine sehr lange Lebensdauer von circa 20000 Stunden erreicht werden. Jedoch werden für LED-Systeme keine beweglichen Teile, wie rotierende Räder benötigt, und der Aufbau des Systems ist deutlich simpler.

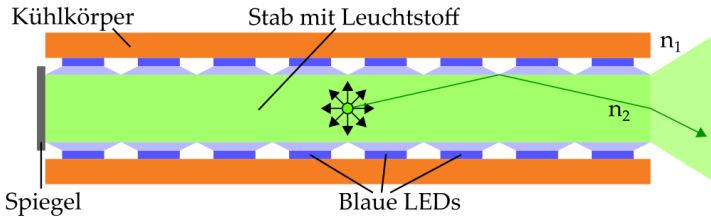
Der Einsatz von LEDs in Projektoren hat aktuell einen großen Nachteil: ihre erreichbare Leuchtdichte ist stark eingeschränkt. Diese hängt vorwiegend von der maximalen Stromdichte auf dem Halbleiterchip ab, die heute (2018) bei etwa  $4 \text{ A/mm}^2$  liegt. Sie wird vor allem durch den internen Aufbau des LED-Chips limitiert. Des Weiteren nimmt die interne Quanteneffizienz zu höheren Stromdichten hin ab, da hierbei der Anteil nichtstrahlender Effekte zunimmt. Dies wird auch als Droop-Effekt bezeichnet [43].

Die Nutzung der LED-Technologie in Projektoren besitzt aufgrund ihrer inhärenten Eigenschaften sehr viele Vorteile. Um diese auch für Projektoren nutzen zu können, die eine höhere Lichtstromanforderung besitzen, werden in dieser Arbeit neuartige Methoden untersucht, die einen höheren Projektorlichtstrom bewerkstelligen sollen.

### **3.5.2 HIGH LUMEN DENSITY (HLD) KONZEPT**

Ein Konzept, das ebenfalls dieses Ziel verfolgt, wurde im Jahr 2015 von der Firma Philips Lighting unter dem Verkaufsnamen „ColorSpark“ bzw. HLD (engl. high lumen density) vorgestellt. Hierbei wird ein ausgedehnter Stab, der selbst aus einer LuAG:Ce-Konversions-Keramik besteht [44], durch eine große Anzahl von blauen LEDs angeregt. Die LEDs befinden sich an zwei gegenüberliegenden Seiten längs des Stabes. Ein Teil des von den Leuchtstoffpartikeln isotrop emittierten Lichts wird aufgrund des höheren Brechungsindex des Stabes ( $n \approx 1,83$ ) gegenüber der Umgebung durch totale interne Reflexion innerhalb des Stabes in Richtung der beiden Stabenden geführt. Während ein Stabende verspiegelt ist, kann ein Teil der

Strahlung den Stab auf der anderen Seite (entsprechend dem Brechungsgesetz) verlassen. Der beschriebene Aufbau eines HLD-Moduls ist in Abbildung 3.16 veranschaulicht.



**Abbildung 3.16:** Schematischer Aufbau eines grünen HLD-Moduls.

Die Strahldichte auf der Ausgangsseite des Stabes ist deutlich höher als die Strahldichten der individuellen blauen LEDs. Möglich ist dies aufgrund des Konversionsprozesses innerhalb des Stabes. Theoretisch ist die Steigerung der Strahldichte nur durch die Stokes Verschiebung und die Temperatur des Konversionsmaterials [34] begrenzt.

Das Konzept bietet die Möglichkeit, durch die Veränderung der Querschnittsfläche des Stabes die Étendue der Lichtquelle sowohl in der Größe als auch in der Form an das entsprechende Mikrodisplay anzupassen. Der bereitgestellte Lichtstrom kann zudem beeinflusst werden, ohne die Abstrahlcharakteristik zu verändern. Er skaliert nahezu linear mit der Länge des Stabes und der Anzahl der LEDs [45].

Die vielen verschiedenen Verarbeitungsprozesse der Strahlung, die nach der Erzeugung durch viele LED-Chips stattfinden, haben eine starke Reduktion der Effizienz zur Folge. Weiterhin muss die immense Wärmemenge, die durch die große Anzahl an LEDs und den Konver-

sionsprozess im Stab während des Betriebs erzeugt wird, hinreichend an die Umgebung abgeführt werden.

Durch dieses Konzept kann sehr viel Licht für den grünen Kanal des Projektionssystems bereitgestellt werden, wodurch auch der Lichtstrom des Gesamtsystems positiv beeinflusst werden kann. Aufgrund der notwendigen aktiven Kühlung des Systems und der geometrischen Ausdehnung des Stabs, nimmt diese Lichtquelle gegenüber einer grünen Höchstleistungs-LED sehr viel Bauraum ein. Dadurch sind ihre Anwendungsmöglichkeiten in Projektoren, bei denen der Bauraum von Bedeutung ist, deutlich eingeschränkt.

Dennoch zeigt das Konzept einen wirksamen ersten Schritt auf, die Leuchtdichte von LEDs über die aktuellen Limitierungen hinaus zu steigern.

### **3.6 ZUSAMMENFASSUNG**

In diesem Kapitel wurden die verschiedenen Arten von Beleuchtungseinheiten aufgegriffen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und für Projektoren geeignet sind, die mit einem Mikrodysplay funktionieren. Zu diesen Beleuchtungseinheiten gehören Höchstdruckgasentladungslampen kombiniert mit einem Farbfilterrad, blaue Halbleiterlaser kombiniert mit einem Phosphor- und einem Farbfilterrad und eine LED-basierte Beleuchtungseinheit.

Bei der Höchstdruckgasentladungslampe handelt es sich um die ausgereifteste und in Projektoren am besten etablierte Lichtquelle. Aufgrund ihres Wirkprinzips, ihrer vergleichsweise geringen

Lebensdauer und ihres Quecksilbergehalts ist sie jedoch den anderen beiden Beleuchtungssystemen technisch unterlegen und wird, längerfristig betrachtet, durch eine Halbleiterlösung ersetzt werden müssen.

Eine Halbleiterlösung stellt das Laser-Phosphor-System dar. Aufgrund der sehr kleinen Étendue blauer Halbleiterlaser kann die Ausgangsleistung des Systems hervorragend durch die Anzahl der Laserdioden eingestellt werden. Die Primärfarben werden durch das Anregen entsprechender Leuchtstoffe erzeugt. In diesem System ist vor allem die Erzeugung von rotem Licht eine Herausforderung, da bei den aktuell verwendeten Materialien ein großer Teil des erzeugten Lichts durch den Filter entfernt werden muss, um den geforderten Farbraum zu erreichen. Stoffe, die langwellige Strahlung emittieren, existieren zwar, weisen jedoch ein stärkeres Einschnürverhalten auf, weshalb sie in diesen Systemen nicht verwendet werden. Darüber hinaus ist der erforderliche optische Aufbau komplex und das Zusammenführen der Strahlen individueller Laserdioden erfordert aufwendige optische Komponenten. Aus diesen Gründen ist zu erwarten, dass Laser-Phosphor-Beleuchtungseinheiten vornehmlich in Projektoren angewendet werden, die sehr viel Lichtstrom bereitstellen sollen und bei denen eine ausgewogene Farbdarstellung eine eher untergeordnete Rolle spielt.

LED-basierte Beleuchtungssysteme erzeugen die Primärfarben direkt durch drei LEDs der Farben Rot, Grün und Blau. Sie erzeugen das Licht nur dann, wenn es vom System gefordert wird. Mit ihren spektralen Eigenschaften kann der geforderte Farbraum sehr einfach erreicht werden, ohne dass große Anteile des emittierten Spektrums

durch Filter entfernt werden müssen. Diese Eigenschaften, der Verzicht auf rotierende Bauteile im System und der relativ einfache Systemaufbau machen sie zu einer sehr vorteilhaften Lösung für Projektionssysteme. Sie besitzen jedoch einen entscheidenden Nachteil im System: aufgrund ihrer limitierten Leuchtdichte sind Systeme, die hohe Ausgangslichtströme erzeugen müssen, noch nicht realisierbar. Einen ersten Schritt zu höheren Leuchtdichten macht ein aktuelles System der Firma Philips Lighting, welches viele blaue LEDs und einen Konverterstab nutzt, um hohe Leuchtdichten für den grünen Farbkanal bereitzustellen. Hier werden jedoch weitere Alternativen und Konzepte für die beiden anderen Farbkanäle benötigt, um den Einsatz von LEDs in Projektoren weiter voranzutreiben. Derartige Konzepte werden im folgenden Kapitel vorgestellt.



## Kapitel 4

# STEIGERUNG DES AUSGANGSLICHTSTROMS

In diesem Kapitel werden Konzepte erarbeitet, die dazu beitragen sollen, den Ausgangslichtstrom von LED-Projektoren zu über die aktuellen Limitierungen hinaus zu steigern.

Zunächst wird das bereits existierende Konzept des sogenannten Light Recycling mit aktuellen Randbedingungen untersucht. Daraufhin wird ein neues Konzept für konversions-basierte LEDs entwickelt und unter Anwendungsbedingungen evaluiert. Daraufhin werden Konzepte aufgezeigt, die die speziellen thermischen Eigenschaften von AlInGaP-LEDs nutzen, um die Leuchtdichte zu steigern.

Zuletzt werden die aufgezeigten Konzepte auf ein LED-Projektionssystem übertragen und die erreichbaren Verbesserungen im Gesamtsystem ermittelt.

### 4.1 LED LIGHT RECYCLING

Das Prinzip des Light Recycling beruht darauf, einen Teil der von der Lichtquelle emittierten Strahlung zurück auf die Lichtquelle zu lenken. Diese Strahlung kann dann, abhängig von der Lichtquelle, transmittiert, reflektiert oder absorbiert werden. Aktuelle Hoch-leistungs-LEDs

besitzen aufgrund ihrer inneren Beschaffenheit eine hohe Reflektivität, weshalb sie sich für das Light Recycling eignen. Das Light Recycling bei LEDs wurde bereits vielfach untersucht [46–50], jedoch fanden die Konzepte abseits der Labors bisher kaum Anwendung. Der Aufwand der zum Teil durch Patente geschützten Aufbauten und besonders die starke Reduzierung der Effizienz sind Gründe hierfür. Nichtsdestotrotz kann das Prinzip des Light Recyclings dazu beitragen, die Leuchtdichte von LEDs zu steigern. Aufgrund der stetigen Änderung der Eigenschaften der Halbleiterchips wird das Konzept in dieser Arbeit erneut aufgegriffen. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf die Anwendbarkeit in Projektionsanwendungen gerichtet.

#### **4.1.1 KONZEPT**

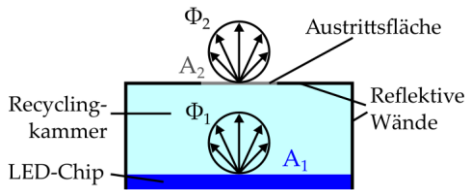
Die Grundidee besteht darin, einen Light Recycling Prozess in einem LED-Package zu realisieren, wodurch eine einfache Integration ins System gewährleistet wird. Im nachfolgend beschriebenen Konzept strahlt ein LED-Chip mit einer bestimmten Emissionsfläche in ein Medium, das eine Austrittsfläche mit geringerem Flächeninhalt besitzt. Ausgenommen der Ein- und der Austrittsfläche, ist das Medium vollständig von diffus reflektierendem Material umgeben. Aufgrund der Beschaffenheit der LED-Chips ist anzunehmen, dass diese im Wesentlichen diffus reflektieren.

Die vom LED-Chip emittierte Strahlung, die nicht auf direktem Weg durch die Austrittsfläche nach außen dringen kann, wird an den Wänden reflektiert und gelangt so wieder auf den LED-Chip. Bei idealem, diffusem Reflexionsverhalten des umgebenden Materials und

des LED-Chips gelangt die gesamte Strahlung nach beliebig vielen Reflexionen innerhalb der Recyclingkammer durch die Austrittsfläche. Theoretisch ist dadurch eine maximale Steigerung der Strahldichte um das Verhältnis der Chipfläche zur Austrittsfläche zu erreichen:

$$g_{L,max} = \frac{L_2}{L_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (4.1)$$

Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.1:** Grundlegendes Konzept des Light Recycling innerhalb eines LED-Gehäuses.

Unter realen Bedingungen kann die Leuchtdichte nicht um diesen Wert angehoben werden. Die Leuchtdichteverstärkung hängt stark von den Reflexionsgraden des Chips und des umgebenden Materials ab, da die Zahl der Reflexionen innerhalb der Recyclingkammer sehr hoch sein kann.

Sowohl die Größe des Emitters als auch der Ausgangsfläche kann zunächst beliebig gewählt werden. In der Anwendung wäre es somit möglich, die Étendue der Lichtquelle an die des Mikrodisplays anzupassen. Auf diese Weise könnten die Verluste im System aufgrund der geometrischen Fehlanpassung minimiert werden. Bei der Wahl des Flächenverhältnisses muss jedoch ein Kompromiss aus der

Strahldichte und der aufgewendeten elektrischen Leistung getroffen werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Effizienz des Bauteils reduziert um den Faktor

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{g_L A_2}{A_1} \quad (4.2)$$

Aufgrund der Verluste durch die begrenzten Reflektivitäten entsteht außerdem zusätzliche Wärme im Bauteil, die im Wesentlichen durch den LED-Chip hindurch, mithilfe des Kühlsystems abgeführt werden muss. Aus diesem Grund werden in dieser Untersuchung Verhältnisse der Austritts- zur Emissionsfläche der Chips von etwa 0,5 gewählt.

Das Konzept ist grundsätzlich für alle drei Farben anwendbar. Diese unterscheiden sich aufgrund der verschiedenen Halbleiter- und Chiptechnologien (blau: InGaN, rot: AlInGaP) oder aufgrund des verwendeten Konverters (grün) stark in ihren Eigenschaften. Da das Grundkonzept nicht differiert, wird im Folgenden ein gemeinsames Simulationsmodell verwendet. Experimentell werden die drei Farben jeweils unabhängig untersucht.

Im Folgenden wird das Konzept auf einen 2 mm<sup>2</sup> großen Chip und eine etwa halb so große Auskoppelfläche angewandt. Die entsprechende Étendue von 3,14 mm<sup>2</sup> sr ist deutlich kleiner als die der in Abschnitt 3.1.1 aufgelisteten DMDs. Größere Emissionsflächen würden einen Aufbau von mehreren Chips innerhalb eines Gehäuses erfordern. Die Verwendung eines einzelnen Chips erleichtert den Aufbau der Konzept- und Referenzbauteile, ermöglicht hierdurch eine hohe Anzahl an Versuchsbauteilen und verringert die Möglichkeiten von Abweichungen, die zwischen den Bauteilen einer Variante. Auf diese Weise kann die Fehlerwahrscheinlichkeit verringert werden und es

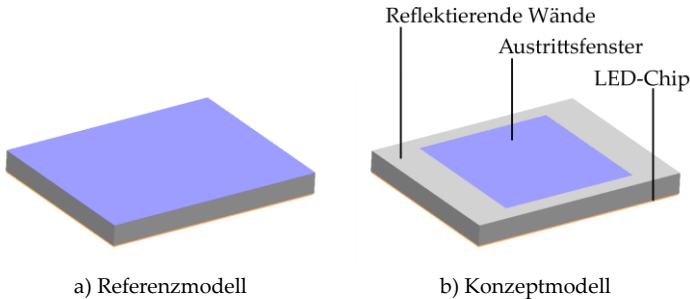
können verlässlichere Ergebnisse generiert werden. Es ist zu erwarten, dass eine Skalierung auf größere Chipflächen ohne weiteres möglich ist.

### 4.1.2 SIMULATIONSMODELL

Da der Light Recycling Prozess durch die zahlreichen Reflexionen innerhalb des Bauteils eine analytische Abschätzung der Einflüsse der Reflektivitäten erschwert, wird ein vereinfachtes optisches Simulationsmodell erstellt. Hierzu wird das Raytracing-Programm LightTools der Firma Synopsis verwendet.

Die LED wird durch einen ebenen Flächenemitter mit Lambertscher Abstrahlcharakteristik modelliert. Dessen Oberfläche ist diffus reflektierend mit einer effektiven Reflektivität  $R_{chip}$ . In Anlehnung an die folgenden experimentellen Aufbauten besteht die Recyclingkammer aus einem Medium mit einem Brechungsindex von 1,77. Der Spalt von 10  $\mu\text{m}$  zwischen der LED und der Kammer wird mit Material mit einem Brechungsindex von 1,41 aufgefüllt. Das entspricht dem Wert von gängigen Silikonklebern. Die Seitenwände und der Flächenbereich außerhalb der Austrittsfläche der Recyclingkammer reflektieren diffus mit einem effektiven Reflexionsgrad von  $R_{RK}$ . Die Ein- und Austrittsbereiche der Kammer besitzen optisch glatte Oberflächen. Um eine Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Experiment zu gewährleisten, werden die Maße der beiden Flächen entsprechend den Experimentalbauten gewählt. Die Eintrittsfläche entspricht der LED-Emissionsfläche von 1,59 mm x 1,25 mm. Das Referenzmodell weist eine ebenso große Austrittsfläche auf. Die Austrittsfläche des Ver-

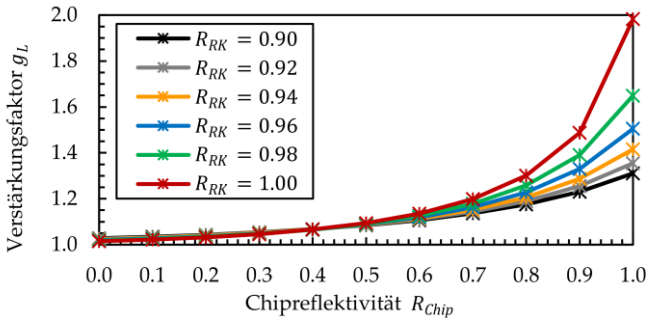
suchsmodells besitzt eine Länge und Breite von jeweils 1,00 mm und liegt zentriert oberhalb der Grundleuchtfläche. Die Dicke der Recyclingkammer beträgt 150  $\mu\text{m}$ . In Abbildung 4.2 sind die beiden Simulationsmodelle dargestellt.



**Abbildung 4.2:** LightTools Simulationsmodelle des Light Recycling Konzepts.

Die Simulation wird mit monochromatischem Licht einer Wellenlänge von 550 nm durchgeführt. Fresnelsche Reflexionen an den Materialübergängen werden nicht berücksichtigt. Die Simulationen werden bei verschiedenen Reflexionsgraden der Chip- und der Kammeroberflächen durchgeführt. Die hieraus ermittelten Verstärkungsfaktoren sind in Abbildung 4.3 aufgetragen.

Die Graphen zeigen, dass der Verstärkungsfaktor bei Chipreflektivitäten oberhalb von 0,8 überproportional zunimmt. Zudem ist zu erkennen, dass die Kurven verschiedener Reflexionsgrade der Recyclingkammer bei steigenden Chipreflektivitäten deutlich auseinanderlaufen. Während bei  $R_{RK} = 0,90$  ein Maximalwert von 1,31 erreicht wird, liegt das Maximum bei  $R_{RK} = 0,98$  bei 1,65. Bei Reflexionsgraden von jeweils 100 % wird das theoretische Maximum von 1,99 erreicht.



**Abbildung 4.3:** Simulierter Recycling Verstärkungsfaktor in Abhängigkeit der Chipreflektivität und der Reflektivität der Recyclingkammer bei einer LED-Fläche von  $1,99 \text{ mm}^2$  und einer Austrittsfläche von  $1,00 \text{ mm}^2$ .

Aus der Simulation wird ersichtlich, dass das Potential des Light Recycling Konzepts sehr stark von den Werten der erreichbaren Reflexionsgrade abhängt. Können hier hohe Werte erreicht werden, ist eine signifikante Erhöhung der Leuchtdichte von LEDs möglich.

### 4.1.3 EXPERIMENTELLE AUFBAUTEN

Experimentelle Aufbauten sollen zeigen, welche Verstärkungswerte in der Praxis zu realisieren sind. Um im Folgenden die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden die LED-Chips, die für die jeweiligen Referenz- und Versuchsbauteile verwendet werden, gemeinsam auf einem Wafer prozessiert. Sie weisen vernachlässigbar geringe Abweichungen in ihren elektro-optischen Eigenschaften auf.

Für alle Aufbauten werden oberflächenemittierende Hochleistungs-LED-Chips der Firma OSRAM OS mit einer Emissionsfläche von  $1,59 \times 1,25 \text{ mm}^2$  auf keramische Träger mit geeigneten elektrischen

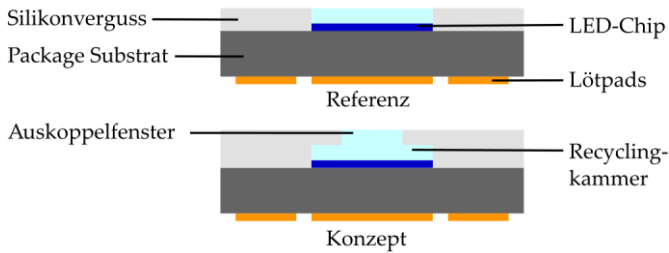
Kontaktstrukturen aufgebracht und elektrisch kontaktiert. Auf die LED-Oberfläche wird ein 150  $\mu\text{m}$  dickes Saphirglas aufgeklebt, das die gleichen Maße wie die Emissionsfläche der LED besitzt. Dieses Saphirplättchen bildet die Recyclingkammer.

Die Referenzbauteile werden daraufhin bis zu oberen Kante des Saphirplättchens mit einer Silikonmasse, die einen Titandioxidgehalt von 35 % aufweist, vergossen. Dieses Material bedeckt die Seitenwände des LED-Chips und des Saphirplättchens. Es besitzt eine hervorragende Reflektivität im sichtbaren Wellenlängenbereich von über 90 %. Die Versuchsbauteile werden vor dem Vergießen mit einem zusätzlichen Glasplättchen mit einer Fläche von 1,00 x 1,00  $\text{mm}^2$  versehen, das mittig auf dem größeren Plättchen platziert wird.

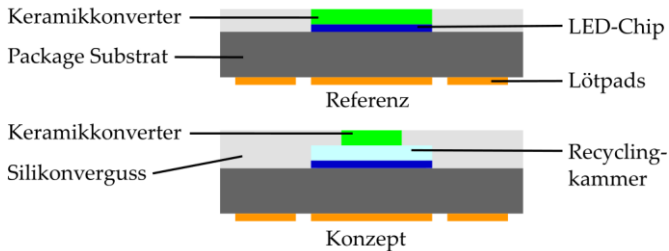
Auf die Bauteile, die grünes Licht emittieren sollen, werden stattdessen Keramikkonverter mit einer Fläche von 1,03 x 1,03  $\text{mm}^2$  aufgebracht. Auch der Referenzaufbau der grünen Bauelemente unterscheidet sich: Statt dem Saphirplättchen kommt hier ein keramisches Konverterplättchen mit einer Fläche von 1,55 x 1,235  $\text{mm}^2$  zum Einsatz.

Schematische Darstellungen der LED-Gehäuse der roten und blauen Referenz- und der Konzeptbauteile sind in Abbildung 4.4 gegeben. Dementsprechend sind die grünen Bauteile in Abbildung 4.5 gezeigt.



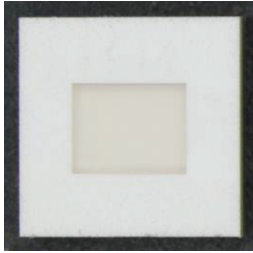


**Abbildung 4.4:** Schematische Darstellungen der blauen und roten Referenz- und Konzeptaufbauten.



**Abbildung 4.5:** Schematische Darstellungen der grünen Referenz- und Konzeptaufbauten.

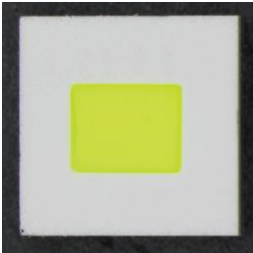
Für die Evaluation werden von jeder Variante funktionsfähige Bauteile aufgebaut. Fotos der realisierten Referenz- und Konzeptbauteile sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass sich die Austrittsfläche der Konzeptbauteile im Gegensatz zu den Referenzteilen nicht zentrisch im Gehäuse befindet. Dies ist dadurch begründet, dass für die Konzeptbauteile Träger verwendet wurden, die lediglich ein leicht unterschiedliches Kontaktlayout besitzen. Hier liegt der Chip etwas versetzt im Package, das Austrittsfenster liegt zentriert auf der Emissionsfläche des Chips.



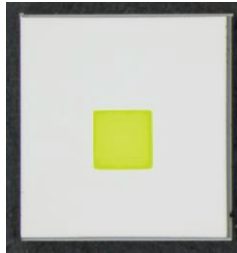
a) Referenzbauteil blau  
(InGaN)



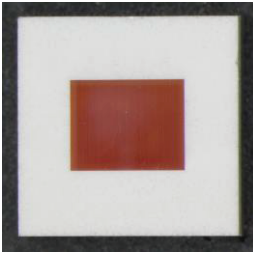
b) Konzeptbauteil blau  
(InGaN)



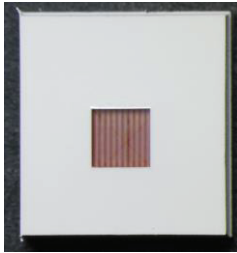
c) Referenzbauteil grün  
(InGaN + Konverter)



Konzeptbauteil grün  
(InGaN + Konverter)



e) Referenzbauteil rot  
(AlInGaP)



f) Konzeptbauteil rot  
(AlInGaP)

**Abbildung 4.6:** Fotos der Oberseite der aufgebauten Referenz- und Konzeptbauteile (aufgenommen durch ein Lichtmikroskop).

#### 4.1.4 MESSERGEBNISSE

Sämtliche Bauteile werden bei einer Temperatur von 25 °C und einer Stromstärke von 2,0 Ampere (InGaN) bzw. 1,4 Ampere (AlInGaP) elektro-optisch charakterisiert. Ihre optischen Eigenschaften, wie beispielsweise die Strahlungsleistung und der Lichtstrom, werden während eines 25 Millisekunden langen Strompulses bestimmt.

Eine geringe Anzahl der Bauteile wird außerdem bei verschiedenen Stromstärken vermessen. Hierzu werden die Bauteile auf passende Kupfer-Metallkernplatinen aufgelötet. Das verwendete Messsystem besitzt hierfür ein Kühlplatte mit einstellbarer Temperatur, präzise Stromquellen zur elektrischen Versorgung und eine Ulbrichtkugel mit einem gekoppelten Spektrometer, um die spektrale Verteilung und den Strahlungsfluss zu messen [51].

Um Informationen über die lokalen Leuchtdichteverteilungen der Bauteile zu erhalten, werden an einzelnen Bauteilen zusätzlich Leuchtdichtemessungen durchgeführt.

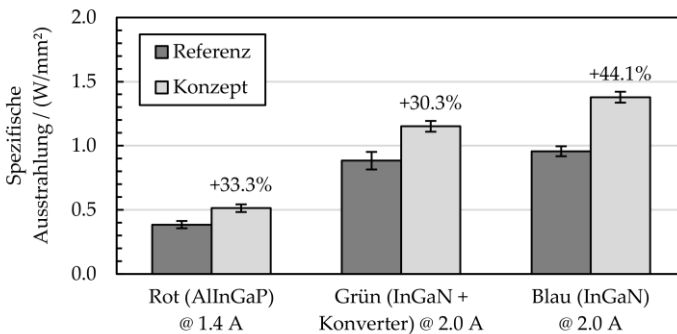
##### 4.1.4.1 SPEZIFISCHE AUSSTRAHLUNG

Der Vergleich der Light Recycling Bauteile mit den Referenzen erfolgt anhand der spezifischen Ausstrahlung  $M$ , die als Strahlungsleistung  $d\Phi$  pro emittierendem Flächenelement  $dA$  definiert ist:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (4.3)$$

Hierbei wird angenommen, dass die Abstrahlcharakteristika der Referenzen und der Versuchsbauteile nicht signifikant voneinander abweichen und dass der gesamte Strahlungsfluss von der definierten Austrittsfläche stammt. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Austrittsflächen exakt die definierten Maße besitzen und vernachlässigbar geringen Toleranzen unterliegen. Unter dieser Voraussetzungen ist die spezifische Ausstrahlung direkt proportional zur Strahldichte des jeweiligen Bauteils.

Im folgenden Säulendiagramm in Abbildung 4.7 sind die Mittelwerte der spezifischen Ausstrahlung der Bauteile dargestellt. Die Mittelwerte wurden jeweils aus den Messwerten von 150 Bauteilen je Variante errechnet.



**Abbildung 4.7:** Vergleich der spezifischen Ausstrahlung von Konzept und Referenz von Rot, Grün und Blau bei 25 °C (Fehlerbalken  $2\sigma$ ).

Im Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass die Konzeptbauteile signifikant höhere Werte aufweisen als ihre entsprechenden Referenzen. Alle drei Farben zeigen eine Steigerung in ihrer spezifischen

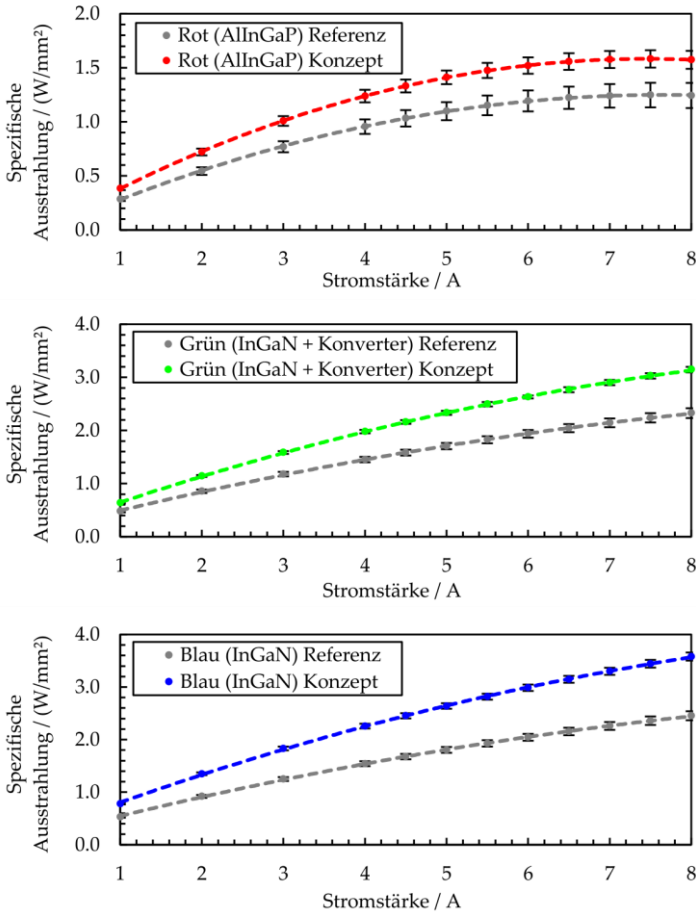
Ausstrahlung. Die grüne LED zeigt mit 30 % den geringsten Zuwachs, darauf folgt die rote mit 33 %. Die blaue LED weist mit 44 % die höchste Zunahme auf.

Die Berücksichtigung der Augenempfindlichkeit  $V(\lambda)$  und der Vergleich der spezifischen Lichtausstrahlungen  $M_v$  zeigen keine signifikante Veränderung der Verstärkungswerte. Auch sind keine Unterschiede zwischen den Spitzenwellenlängen von Konzept und Referenz festzustellen. Diese betragen 621 nm bei den roten, 517 nm bei den grünen, und 455 nm bei den blauen LEDs.

Für die nachfolgenden Messungen werden zufällig drei Bauteile jeder Variante ausgewählt und auf passende Metallkernplatinen mit Kupferkern aufgebracht. Diese werden mittels Wärmeleitpaste an eine Kühlplatte gekoppelt, die konstant auf einen Wert von 25 °C geregelt wird. Die Bauteile werden ebenfalls während eines 25 ms langen Strompulses mit Stromstärken bis zu acht Ampere vermessen. Hierbei ist zu beachten, dass bei hohen Stromstärken ein hoher Wärmestrom induziert wird, der zu einer starken Temperaturerhöhung in der Sperrschicht der LEDs führt. Abfallende Werte des Verstärkungsfaktors bei steigenden Stromstärken können folglich auf die Stromstärke oder die Sperrschichttemperatur zurückzuführen sein. Konstante Werte dagegen weisen darauf hin, dass die ermittelten Verstärkungswerte auch unter Applikationsbedingungen erreicht werden können.

In Abbildung 4.8 sind die aus den Messergebnissen ermittelten Werte der spezifischen Ausstrahlung der gemessenen Konzept- und Referenzbauteile in Abhängigkeit der angelegten Stromstärke aufgetragen.

#### 4. Steigerung des Ausgangslichtstroms



**Abbildung 4.8:** Spezifische Ausstrahlung der roten, grünen und blauen Referenz- und Konzept-LEDs bei einer Kühlkörpertemperatur von 25 °C (Fehlerbalken  $2\sigma$ ).

Die Kurven der grünen und blauen Konzept- und Referenzbauteile zeigen jeweils ähnliche Verläufe. Alle steigen monoton an und flachen bei hohen Stromstärken leicht ab. Die Berechnung der Verstärkungsfaktoren in Abhängigkeit der Stromstärke zeigt nahezu konstante

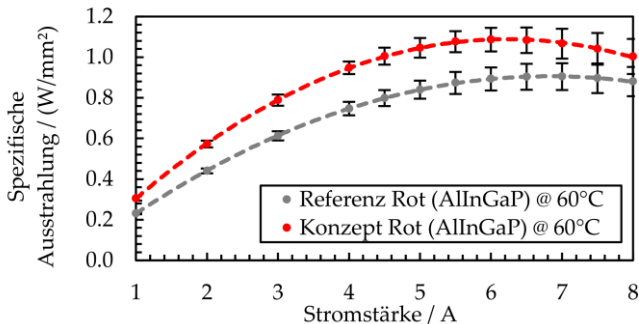
Werte über den gesamten Strombereich auf. Die grüne Konzept-LED erreicht bei der maximalen Stromstärke von acht Ampere einen mittleren Verstärkungsfaktor von 1,35. Bei dieser Stromstärke erreicht das Referenzbauteil im Mittel eine spezifische Ausstrahlung von  $2,33 \text{ W/mm}^2$ , die Light-Recycling-LED einen Wert von  $3,15 \text{ W/mm}^2$ . Das fotometrische Äquivalent, die spezifische Lichtausstrahlung, beträgt  $1050 \text{ lm/mm}^2$  (Referenz) und  $1410 \text{ lm/mm}^2$ . Die Spitzenwellenlängen zeigen keinen signifikanten Unterschied und liegen jeweils bei  $524 \text{ nm}$ .

Die gemessenen blauen Referenz-LEDs besitzen beim maximalen Strom eine spezifische (Licht-)Ausstrahlung von  $2,45 \text{ W/mm}^2$  ( $104 \text{ lm/mm}^2$ ). Die Konzept-LEDs erreichen bei acht Ampere  $3,58 \text{ W/mm}^2$  ( $155 \text{ lm/mm}^2$ ). Diese Werte entsprechen Verstärkungsfaktoren von 1,46 (1,49) bei acht Ampere. Die Spitzwellenlängen von Konzept und Referenz liefern hier Werte von jeweils  $455 \text{ nm}$ .

Sowohl die rote Light-Recycling-LED als auch das entsprechende Referenzbauteil zeigen ab einer Stromstärke von etwa fünf Ampere einen stark abflachenden Kurvenverlauf. Ab einer Stromstärke von  $7,5 \text{ Ampere}$  steigt die spezifische Ausstrahlung nicht weiter an. Der Wert beträgt hier bei der Referenz  $1,25 \text{ W/mm}^2$ , und  $1,58 \text{ W/mm}^2$  bei der Light-Recycling-LED. Die spezifische Lichtausstrahlung erreicht jeweils bereits bei  $6,5 \text{ Ampere}$  ihr Maximum von  $287 \text{ lm/mm}^2$  (Referenz) bzw.  $364 \text{ lm/mm}^2$  (Konzept). Die Spitzwellenlängen betragen jeweils  $626 \text{ nm}$ . Die Verstärkungsfaktoren der roten LEDs gehen zu höheren Stromstärken hin stark zurück. Während bei zwei Ampere ein Wert von 1,32 erreicht wird, beträgt dieser bei sechs Ampere nur noch 1,27. Da die Möglichkeit besteht, dass der Verstär-

kungsfaktor bei höheren Temperaturen weiter absinkt, werden zusätzliche Messungen an den roten LEDs durchgeführt.

Hierzu werden die Betriebsparameter an applikationsähnliche Bedingungen angepasst und die Bauteile erneut in Abhängigkeit der Stromstärke untersucht. Die LEDs werden dazu im Dauerpuls mit einem Tastverhältnis von 50 % und einer Frequenz von 240 Hz betrieben. Die Kühlkörpertemperatur beträgt dabei 60 °C. Diese Betriebsbedingungen entsprechen näherungsweise den Anwendungsbedingungen in einem LED-Projektor. Die ermittelten Werte der spezifischen Ausstrahlung dieser Messungen sind im Diagramm in Abbildung 4.9 dargestellt.



**Abbildung 4.9:** Spezifische Ausstrahlung der untersuchten roten Referenz- und Konzeptbauteile bei einer Temperatur von 60 °C, einer Frequenz von 240 Hz und einem Tastgrad von 50 % (Fehlerbalken  $2\sigma$ ).

Die spezifische Ausstrahlung nimmt mit steigender Stromstärke sowohl bei der Referenz, als auch beim Konzept zu. Während die Referenz ihr Maximum von 0,91 W/mm<sup>2</sup> erst bei sieben Ampere erreicht, liegt das Maximum des Konzepts von 1,07 W/mm<sup>2</sup> bereits bei

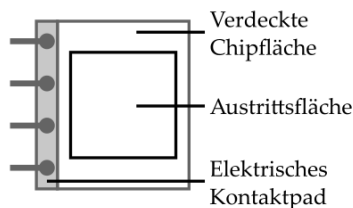


einer Stromstärke von sechs Ampere. Somit liegt der effektive Verstärkungsfaktor bei der jeweils maximalen Ausstrahlung bei 1,18.

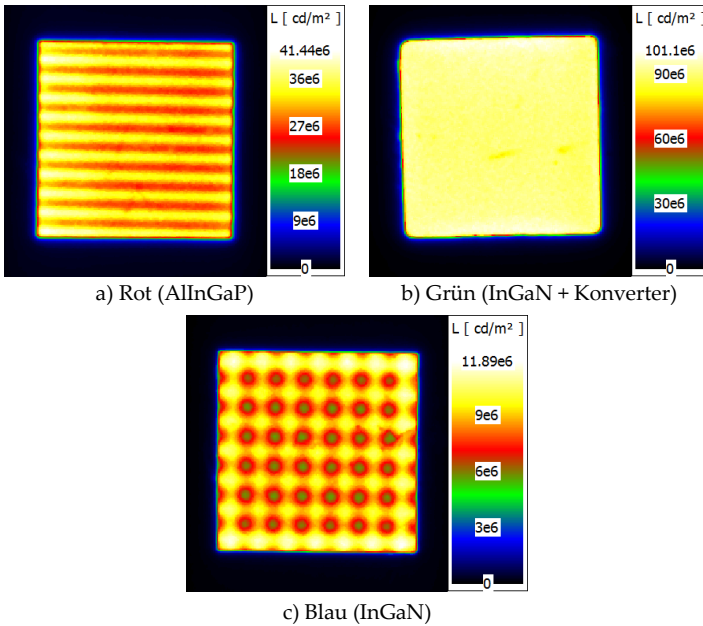
#### 4.1.4.2 LEUCHTDICHTE

Leuchtdichteaufnahmen sollen zusätzlich Aufschluss über die Leuchtdichteverteilungen der Austrittsflächen geben. Hiermit kann außerdem ermittelt werden, welcher Anteil des Lichts das Vergussmaterial auf der Oberseite der Recyclingkammer durchdringt und inwieweit die eingangs getroffene Annahme, dass der gesamte Strahlungsfluss von der definierten Austrittsfläche abgestrahlt wird, zutrifft.

Die Leuchtdichte jeweils eines Konzeptbauteils wird mithilfe einer Leuchtdichtekamera gemessen. Die Messungen werden während eines 25 ms langen Strompulses mit einer Stromstärke von einem Ampere durchgeführt. Die Orientierung der LED-Chips während der Aufnahmen ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die entsprechenden Leuchtdichtebilder sind in Abbildung 4.11 dargestellt.



**Abbildung 4.10:** Orientierung des LED Chips während der Leuchtdichteaufnahmen.



**Abbildung 4.11:** Leuchtdichtebilder der Austrittsflächen der Konzeptbauteile bei einer Stromstärke von einem Ampere (lineare Leuchtdichteskala).

Die Leuchtdichtebilder unterscheiden sich sehr stark voneinander. Die lineare Kontaktstruktur der roten LED (Abbildung 4.11 a) ist deutlich an den Bereichen niedrigerer Leuchtdichten zu erkennen. Des Weiteren sinkt hier der Wert der Leuchtdichte von der linken Seite, auf der sich das elektrische Kontaktpad auf der Oberseite des LED-Chips befindet, zur rechten Seite hin auf 84 % des Maximalwerts ab und steigt am Rand wieder auf 89 % an.

Die grüne LED (Abbildung 4.11 b) zeigt ein sehr homogenes Leuchtbild. An den Rändern der Austrittsfläche nimmt die Leuchtdichte jeweils etwas zu. Diese Zunahme ist entlang der längeren Seite des LED-Chips etwas stärker als entlang der kürzeren.

Die Leuchtdichteverteilung der blauen LED (Abbildung 4.11 c) ist wiederum äußerst inhomogen. Hier sind an den Stellen geringerer Leuchtdichte die knopfförmigen Kontaktmuster des blauen LED-Chips auszumachen. Zudem ist, analog zur grünen LED, eine Erhöhung der Leuchtdichte an den Rändern festzustellen.

Die Bereiche um das Auskoppelfenster herum, dort wo der LED-Chip und das Saphirglasplättchen von dem Vergussmaterial bedeckt sind, weisen signifikante Leuchtdichtewerte auf. Sie sind jedoch gering genug, dass sie in der oben gezeigten linearen Darstellung der Leuchtdichtebilder nicht zu erkennen sind. In der folgenden Tabelle 4.1 sind die gemessenen mittleren Leuchtdichten und die entsprechenden Flächeninhalte aufgeführt.

**Tabelle 4.1:** Aus den Leuchtdichteaufnahmen ermittelte Flächeninhalte und mittlere Leuchtdichten der Auskoppelfenster und der umliegenden, verdeckten Chipfläche.

	Fläche	Flächeninhalt	Leuchtdichte
Rot	Fenster	1,0 mm <sup>2</sup>	31,7 cd/mm <sup>2</sup>
	verdeckt	1,0 mm <sup>2</sup>	2,74 cd/mm <sup>2</sup>
Grün	Fenster	1,1 mm <sup>2</sup>	90,8 cd/mm <sup>2</sup>
	verdeckt	0,9 mm <sup>2</sup>	4,52 cd/mm <sup>2</sup>
Blau	Fenster	1,0 mm <sup>2</sup>	8,77 cd/mm <sup>2</sup>
	verdeckt	1,0 mm <sup>2</sup>	0,45 cd/mm <sup>2</sup>

Da von den verdeckten Chipflächen ein signifikanter Strahlungsfluss emittiert wird, muss die getroffene Annahme, dass sämtliche Strahlung nur aus dem Auskoppelfenster tritt, korrigiert werden. Hierzu kann ein Korrekturfaktor  $\kappa$  eingeführt werden:

$$\kappa = \frac{A_1 L_{v1}}{A_1 L_{v1} + A_2 L_{v2}} \quad (4.4)$$

$A_1$  ist die Fläche des Fensters,  $A_2$  die Fläche der abstrahlenden Umgebung.  $L_{v1}$  und  $L_{v2}$  sind ihre entsprechenden Leuchtdichten.

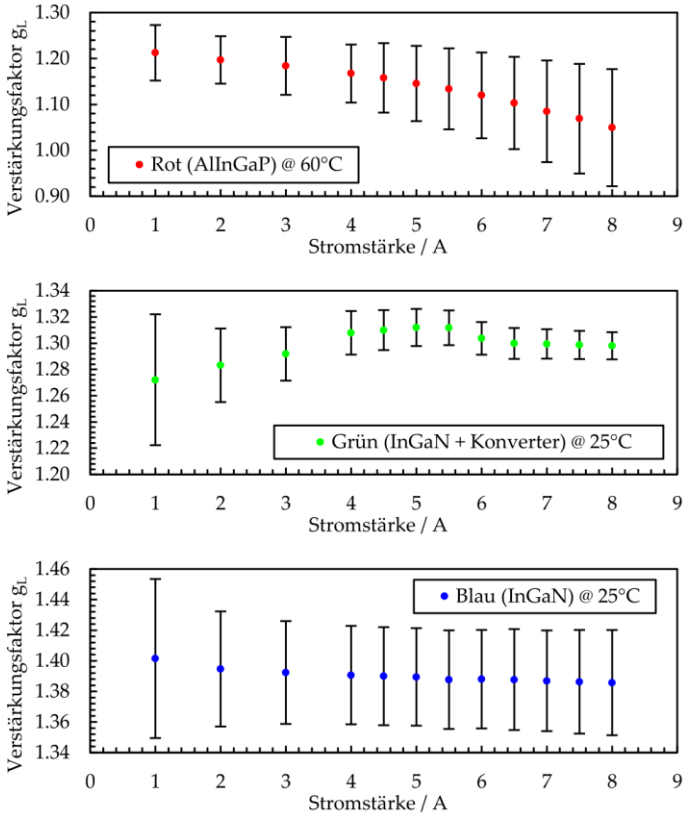
Dieser muss für jede Farbe separat bestimmt werden. Für Rot ist der Wert 0,92, für Grün 0,96 und für Blau 0,95. Um den Einfluss der Transmission des Vergussmaterials zu korrigieren, sind die zuvor ermittelten Verstärkungswerte mit diesen Faktoren zu multiplizieren.

#### 4.1.5 DISKUSSION

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Light-Recycling-LEDs gegenüber den entsprechenden Referenzbauteilen eine erhöhte spezifische Ausstrahlung aufweisen. Die verschiedenen durchgeführten Messungen an den Bauteilen liefern hierbei konsistente Ergebnisse. Die spezifische Ausstrahlung  $M$  ist unter der Annahme, dass Versuchs- und Referenzbauteile die gleiche Abstrahlcharakteristik besitzen, proportional zur Strahldichte  $L$ . Analog gilt dies für die spezifische Lichtausstrahlung  $M_v$  und die Leuchtdichte  $L_v$ .

Aus den ermittelten spezifischen Ausstrahlungen der Konzept- und Referenzbauteile können die Werte der Verstärkungsfaktoren berechnet werden. Durch Multiplikation mit den entsprechenden

Korrekturfaktoren wird die Transmission des Vergussmaterials berücksichtigt. Die berechneten Verstärkungen der drei Farben sind in den Graphen in der folgenden Abbildung 4.12 dargestellt.



**Abbildung 4.12:** Korrigierte Verstärkungsfaktoren der drei Farben in Abhängigkeit der Stromstärke (Fehlerbalken  $2\sigma$ ).

#### 4.1.5.1 ROT

Die rote LED weist einen mit der Stromstärke zurückgehenden Verstärkungsfaktor auf. Dieses Verhalten verstärkt sich bei einer erhöhten Betriebstemperatur. Bei einer Stromstärke von einem Ampere und einer Kühlkörpertemperatur von 25 °C kann eine Verstärkung um den Faktor 1,24 festgestellt werden. Bei anwendungsähnlichen Betriebsbedingungen und einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C kann bei einem Strom von sechs Ampere lediglich eine mittlere Verstärkung um einen Faktor von 1,12 erreicht werden. Ein Erhöhen der Stromstärke hat keinen Zugewinn der Strahlungsleistung oder des Lichtstroms zur Folge. Es ist außerdem zu beachten, dass die errechneten Verstärkungswerte bei höheren Stromstärken mit einer erhöhten Unsicherheit verbunden sind. Diese ist vorwiegend auf die starke Temperaturabhängigkeit der AlInGaP-Chips und Variationen in der thermischen Anbindung an die Wärmesenke zurückzuführen. Es ergeben sich Unterschiede durch die Lötung der individuellen Bauteile auf die Trägerplatinen und durch die Dickenvariation der verwendeten Wärmeleitpaste.

Die Leuchtdichte der roten Recycling-LED ist aufgrund der linearen Kontaktstruktur auf dem LED-Chip sehr inhomogen. Im Leuchtdichtebild ist zu erkennen, dass die Leuchtdichte von links nach rechts stark abnimmt, wobei sich das elektrische Kontaktpad auf der linken Seite befindet. Hierbei ist anzunehmen, dass dies durch den AlInGaP-Chip selbst verursacht wird, zum Beispiel durch eine inhomogene Stromverteilung. Dies würde bedeuten, dass die Fläche, die sich am nächsten zum Kontaktpad befindet, die höchste Leuchtdichte aufweist. Da die dort erzeugte Strahlung jedoch nur durch den Light Recycling

Prozess nach Außen gelangt, kann sie nur indirekt über das Light Recycling genutzt werden.

Vergleicht man das rote Versuchsbauteil mit dem eingangs modellierten Simulationsmodell, gelangt man zu einer effektiven Chipreflektivität von etwa 0,70 im Bereich der Emissionswellenlängen. Dazu trägt auch die Kontaktstruktur auf der Oberseite des Chips bei. Da die Kontaktstruktur selbst kein Licht emittiert und dennoch einen signifikanten Leuchtdichtewert in der Hauptabstrahlrichtung aufweist, ist anzunehmen, dass sie eine vergleichsweise hohe Reflektivität besitzt.

### 4.1.5.2 GRÜN UND BLAU

Die grünen und blauen Light-Recycling-Bauteile besitzen über den gemessenen Strombereich von ein bis acht Ampere sowohl einen stetig ansteigenden Strahlungsfluss, als auch eine nahezu konstante Verstärkung gegenüber ihrer Referenz. Die Schwankungen der Verstärkung der grünen LED im Verlauf der steigenden Stromstärke sind auf Wechsel der Neutraldichtefilter innerhalb des Messsystems zurückzuführen. Bei der maximalen Stromstärke, bei der auch die maximale Strahlungsleistung emittiert wird, zeigt die grüne LED eine Verstärkung um den Faktor 1,30. Die blaue LED weist hier einen Faktor von 1,39 auf. Die dazugehörigen Verstärkungen der spezifischen Lichtausstrahlung bzw. der Leuchtdichte zeigen keine signifikanten Unterschiede zu diesen Werten.

Trotz der stark inhomogen verteilten Leuchtdichte über dem Auskoppelfenster der blauen Light-Recycling-LED werden erhebliche

Verstärkungswerte erzielt. Ein Abgleich mit dem Simulationsmodell führt zu einer effektiven Reflektivität des verwendeten InGaN-Chips von mindestens 0,84 für das emittierte Wellenlängenspektrum. Der Einfluss, den die elektrische Kontaktstruktur, die selbst kein Licht emittiert, auf den effektiven Reflexionsfaktor ausübt, kann aus der Leuchtdichteaufnahme nicht extrahiert werden. Hierfür ist das in der Messung erzielte Kontrastverhältnis nicht ausreichend.

Die Leuchtdichtemaxima treten an Rändern der Austrittsfläche auf. Dies ist besonders augenscheinlich bei der grünen Light-Recycling-LED, unter deren Konverter sich ein blauer InGaN-Chip befindetet. Im Leuchtdichtebild ist deutlich zu erkennen, dass diejenigen Randbereiche der Austrittsfläche die größte Leuchtdichte aufweisen, die an die größte vom Silikonverguss abgedeckte Fläche angrenzen. Dieser Zusammenhang lässt zwei Vermutungen zu: Zum einen ist anzunehmen, dass die mittlere Leuchtdichte durch ein geringeres Flächenverhältnis der Austritts- zur LED-Fläche weiter erhöht werden kann. Zum zweiten wird ein besonderer Einfluss auf die Leuchtdichte am Rand vermutet.

Es ist zu erwarten, dass die Ungleichmäßigkeiten in der Leuchtdichte keine negativen Auswirkungen im Projektionssystem verursachen, da gewöhnlich ein homogenisierendes Element wie ein stabförmiger Integrator verwendet wird.

#### **4.1.6 FAZIT**

Aus den experimentellen Ergebnissen kann bestätigt werden, dass das beschriebene Light Recycling Konzept bei niedrigen Stromstärken bei



allen drei Farben zu einer signifikanten Erhöhung der Leucht- bzw. Strahldichte führt. Bei hohen Stromstärken und maximalen Strahlungsleistungen, wie sie in Projektionsanwendungen benötigt werden, weisen jedoch nur die grüne und blaue Recycling-LED brauchbare Verstärkungswerte von über 30 % auf. Die rote LED zeigt bei hohen Strömen lediglich einen Wert von deutlich unter 20 %, der sich bei erhöhten Temperaturen weiter reduziert. Daher ist zu konkludieren, dass das beschriebene Konzept ohne Modifikationen oder Optimierungen nur für die grüne und blaue LED anwendungsfähig ist. Die Anwendung des Konzepts auf die rote LED müsste dafür entsprechend weitergeführt und optimiert werden. Dies wird vor allem durch die starke intrinsische Temperaturabhängigkeit des AlInGaP-Materialsystems erschwert.

Das Light Recycling Package und dessen Bestandteile können weiter verbessert werden. Durch eine Verfeinerung des Simulationsmodells können diverse Parameter optimiert werden. Hierzu gehören die Geometrie (Form, Höhe) und der Brechungsindex der Recyclingkammer. Auch eine Strukturierung der Auskoppelfläche könnte einen positiven Einfluss auf die Leuchtdichte haben. Weiteres Verbesserungspotential bietet das Vergussmaterial. Kann die Transmission verringert oder gar verhindert werden, ist voraussichtlich eine weitere Steigerung des Verstärkungsfaktors möglich.

Es wird vermutet, dass eine Skalierung des Konzepts auf größere LED-Chipflächen möglich ist, da keine entgegenstehenden Anhaltspunkte identifiziert werden konnten. Trotzdem sollte in weiterführenden Untersuchungen ermittelt werden, inwieweit andere Verhältnisse der Chip- und der Austrittsfläche die Leuchtdichte beeinflussen. Es ist

ebenfalls zu berücksichtigen, dass sich bei einem Teil der LEDs, die in Projektionsanwendungen eingesetzt werden, die Gesamtemissionsfläche aus den Emissionsflächen mehrerer LED-Chips zusammensetzt. Dabei sollte geprüft werden, ob die Lücken zwischen den einzelnen Chips negative Einflüsse auf das Light Recycling haben. Weiterhin sollte die Zuverlässigkeit der Bauteile geprüft werden. Da die kurzweilige Strahlung innerhalb der Recyclingkammer vielfach reflektiert wird, werden die Materialübergänge eventuell zusätzlich belastet.

#### **4.1.7 ZUSAMMENFASSUNG**

In diesem Abschnitt wurde ein Konzept vorgestellt und experimentell überprüft, das die Strahl- bzw. Leuchtdichte eines LED-Chips durch einen Light Recycling Prozess steigern soll. Das Konzept setzt den Light Recycling Prozess innerhalb des LED-Gehäuses um und enthält eine reflektive Recyclingkammer oberhalb der Licht-emittierenden Fläche der LED, die eine reduzierte Austrittsfläche besitzt.

Die Ergebnisse eines vereinfachten Simulationsmodells lieferten signifikante Verstärkungswerte, die starke Abhängigkeiten von den Reflexionsgraden des LED-Chips und der Recyclingkammer zeigten. Daher wurden Versuchs- und Referenzbauteile für die drei Farben Rot, Grün und Blau aufgebaut und elektro-optisch vermessen. Die Referenzen besaßen eine Austrittsfläche von  $1,99 \text{ mm}^2$  (rot und blau) bzw.  $1,91 \text{ mm}^2$  (grün), die Konzeptbauteile wiesen eine Austrittsfläche von  $1,00 \text{ mm}^2$  (rot und blau) bzw.  $1,06 \text{ mm}^2$  (grün) auf. Die grüne LED

enthielt einen blauen LED-Chip und ein Element zur Konversion des Lichts in den grünen Wellenlängenbereich.

Die blauen und grünen Light-Recycling-LEDs erreichten deutliche Verstärkungen der Strahldichte gegenüber ihren entsprechenden Referenz-LEDs von einem Faktor von 1,30 (grün) bzw. 1,39 (blau) bei der maximalen Stromstärke von acht Ampere. Die rote LED zeigte bei Stromstärken von sechs Ampere lediglich Werte von 1,17, die bei höheren Stromstärken weiter absanken auf unter 1,1. Die Leuchtdichteaufnahmen zeigten bei den roten und blauen Konzept-LEDs stark inhomogene Leuchtdichteverteilungen auf der Auskoppelfläche, die vorwiegend durch die elektrischen Kontaktstrukturen der LED-Chips verursacht wurden. Die grüne LED zeigte eine weitgehend homogene Verteilung der Leuchtdichte.

Aus dem ermittelten Verhalten der LEDs wurde geschlossen, dass das Konzept ohne weiterführende Untersuchungen nur für die grüne und blaue LED anwendungsfähig ist. Es konnten keine Faktoren ausgemacht werden, die einer Anwendung des Konzepts auf größere Chipflächen entgegenstehen.

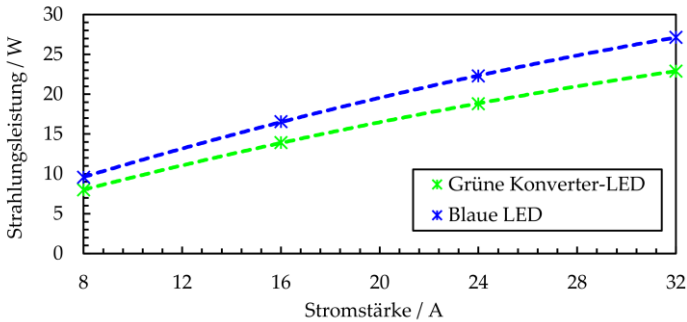
Das Konzept zeigte deutlich, dass ein Light Recycling Prozess innerhalb eines LED-Packages möglich ist, und zu nennenswerten Leucht- und Strahldichteerhöhungen führen kann. Die Technologie bietet außerdem die Möglichkeit, die lichtemittierende Fläche dahingehend zu optimieren, dass die Verluste aufgrund der Fehlanpassung der Étendue der LED zum Mikrodisplay minimiert werden können.

## **4.2 ERHÖHUNG DER ANREGUNG DER GRÜNEN PHOSPHOR-LED**

Dieser Abschnitt der Arbeit behandelt ein Konzept, das die Leuchtdichte der grünen Konversions-LEDs erhöht. Hierbei wird eine weitere blaue LED verwendet, um den grünen Leuchtstoff zusätzlich von der Oberseite anzuregen, ohne die Étendue der grünen Lichtquelle zu vergrößern. Das Konzept nutzt die typische Topologie und die bestehenden optischen Elemente eines LED-Projektors, wodurch eine einfache Integration in das System möglich sein sollte. Ein Teil der Ergebnisse der folgend ausgeführten Untersuchungen wurden im Dezember 2016 in [52] veröffentlicht.

### **4.2.1 KONZEPT**

Wie bereits in Abschnitt 3.5 dieser Arbeit beschrieben, werden in Projektoren vorwiegend grüne LEDs eingesetzt, die auf dem Prinzip der Konversion von Licht funktionieren. Der emittierte Lichtstrom dieser LEDs steigt proportional zur Strahlungsleistung der blauen LED an, die sich unter dem keramischen Konverter befindet. In Abbildung 4.13 sind die Strahlungsleistungen einer grünen Konverter-LED und einer blauen LED dargestellt, die der blauen LED unterhalb des Konverters gleicht.

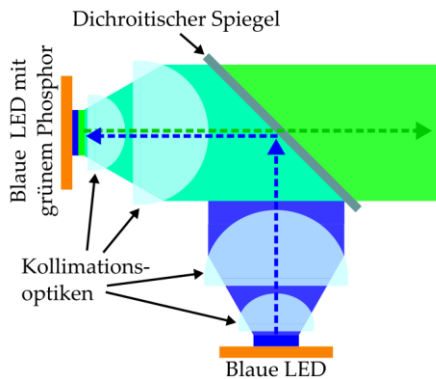


**Abbildung 4.13:** Gemessene Strahlungsleistungen einer grünen Konverter-LED und einer blauen LED

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass bis hin zur maximalen Stromdichte keine Sättigungseffekte auftreten. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass die obere Anregungsgrenze des Leuchtstoffs noch nicht erreicht ist und noch Potential zur Steigerung des Lichtstroms vorhanden ist. Da die derzeit maximal mögliche Stromdichte von etwa  $4 \text{ A/mm}^2$  bereits erreicht ist, kann die anregende Strahlungsleistung folglich nur durch alternative Ansätze gesteigert werden.

Die Grundidee des neuen Konzepts besteht darin, den grünen Leuchtstoff auf dem blauen LED-Chip zusätzlich mit einer weiteren blauen LED von der Oberseite anzuregen. Eine andere, bereits veröffentlichte Arbeit verwendete stattdessen eine Anordnung von mehreren Laserdioden [53]. Bei dem hier vorgestellten Konzept wird die Strahlung der zusätzlichen blauen LED durch ein optisches System auf den Leuchtstoff gelenkt. Dieses lässt sich in zwei Teile separieren. Der erste Teil sammelt und kollimiert die Strahlung, der zweite konzentriert die Strahlung auf den Konverter. Der zweite Teil hat zugleich die Aufgabe, die Strahlung, die vom Leuchtstoff emittiert

wird, aufzunehmen und zu kollimieren. Das Trennen der Anregungsstrahlung ( $< 490 \text{ nm}$ ) und der Ausgangsstrahlung ( $> 490 \text{ nm}$ ) erfolgt durch einen passenden dichroitischen Spiegel. Abhängig von dessen Charakteristik können verschiedene Anordnungen der Komponenten realisiert werden. Eine mögliche Anordnung ist in Abbildung 4.14 schematisch dargestellt. Hier wird ein dichroitischer Spiegel mit Langpasseigenschaften eingesetzt.



**Abbildung 4.14:** Schematische Darstellung des Konzepts mit einem dichroitischen Langpassfilter.

## 4.2.2 POTENZIELLE LEUCHTDICHTEERHÖHUNG

Setzt man voraus, dass die zusätzliche LED die gleichen Eigenschaften besitzt wie die blaue LED unter dem Phosphor, und dass im System keine Verluste auftreten, so kann die Leuchtdichte des Leuchtstoffs verdoppelt werden. Da jedoch Verluste entlang des optischen Pfades auftreten, reduziert sich der Faktor. Für eine Abschätzung der Verluste wird der optische Pfad ausgehend von der zusätzlichen blauen LED

bis ins Innere des Konverters berücksichtigt. Das Licht im Konverter wird nahezu vollständig konvertiert und isotrop abgestrahlt. Folglich übt die Richtung der anregenden Strahlung nur einen geringen Einfluss aus.

Die Strahlungsleistung, die zusätzlich auf den Phosphor einwirkt, hängt vorwiegend von dem Einfangwinkel der verwendeten Optik ab. Je größer dieser Winkel gewählt wird, desto größer ist die eingesammelte Strahlungsleistung. Die LED lässt sich hervorragend durch einen Lambertschen Strahler modellieren. Für diesen gilt folgender Zusammenhang zwischen dem halben Sammelwinkel  $\alpha$ , dem aufgefangenen Strahlungsfluss  $\Phi(\alpha)$ , und der gesamten in den Halbraum emittierten Strahlungsleistung  $\Phi_{2\pi}$ :

$$\Phi(\alpha) = \Phi_{2\pi} \sin^2(\alpha) \quad (4.5)$$

Da der zweite Teil der Optik auch den Einsammelwinkel der Strahlung des Konverters bestimmt, sollten die Einfangwinkel der beiden Optiken aufeinander abgestimmt werden. Da in diesem System die Étendue ebenfalls bestenfalls erhalten bleibt, hat die Wahl eines größeren Winkels nur für die zusätzliche blaue LED keinen positiven Einfluss, da das Licht nicht auf das Phosphorplättchen konzentriert werden kann.

Für die folgende Abschätzung wird angenommen, dass die beiden Optiken aus jeweils zwei Linsen bestehen. In Projektoren sind diese häufig mit Antireflexbeschichtungen versehen, um die Fresnelschen Verluste an den Oberflächen zu reduzieren. Die Verluste pro Oberfläche lassen sich mit etwa 1,5 % abschätzen [9], wobei in der vorgeschlagenen Anordnung acht Linsenoberflächen vorhanden sind.

Der dichroitische Spiegel sollte unter einem Einfallswinkel von  $45^\circ$  in einem Wellenlängenbereich zwischen 420 und 480 nm je nach gewählter Filtercharakteristik einen möglichst hohen Reflexions- bzw. Transmissionsgrad aufweisen. Für ein einfallendes Strahlenbündel mit geringer Divergenz können solche optischen Elemente Werte von etwa 0,98 annehmen.

Der Divergenzwinkel am Ausgang des ersten Linsenpaares beträgt typischerweise etwa  $\pm 5^\circ$ . Der Abstand zwischen den beiden Linsenpaaren hat trotz der geringen Strahldivergenz zur Folge, dass nur ein Teil des kollimierten Lichts die effektive Fläche des zweiten Linsenpaares durchdringen kann. Der Teil des Lichts, der nicht durch diese effektive Fläche tritt, trifft nicht auf den Konverter. Dieser wird entweder von der Apertur der Linse blockiert oder beleuchtet die Fläche um den Leuchtstoff herum. Auf der Basis von optischen Simulationen wird erwartet, dass diese geometrische Effizienz Werte von 0,90 annehmen kann.

Der Rest der Strahlung wird auf den Konverter fokussiert. Dieser besitzt einen Brechungsindex von etwa 1,8. Demzufolge werden rund 8 % des eintreffenden Lichts von der Oberfläche des Konverters aufgrund von Fresnel-Reflexionen zurückgeworfen. Aufgrund der Materialeigenschaften des Konverters wird angenommen, dass die Rückstreuung des blauen Lichts innerhalb des Materials eine untergeordnete Rolle spielt. Aus diesem Grund wird diese nicht in der Berechnung berücksichtigt.

Eine Zusammenfassung der Werte ist in Tabelle 4.2 gegeben.



**Tabelle 4.2:** Zusammenfassung der Effizienzen der einzelnen Bauteile im optischen Pfad der blauen LED in Abhängigkeit des Sammelwinkels der Kollimationsoptik.

<b>Sammelwinkel</b>	<b>± 60°</b>	<b>± 65°</b>	<b>± 70°</b>	<b>± 75°</b>	<b>± 80°</b>
Eingefangene Strahlungsleistung	0,75	0,82	0,88	0,93	0,97
Linsen	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Dichroitischer Spiegel	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Geometrische Effizienz	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Konverteroberfläche	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
<b>Gesamt</b>	<b>0,54</b>	<b>0,59</b>	<b>0,63</b>	<b>0,67</b>	<b>0,70</b>

Aus dem Produkt der einzelnen Werte ergibt sich jeweils der Anteil des Strahlungsflusses der zusätzlichen blauen LED, der in den Konverter eindringen kann. Die Werte liegen, abhängig vom Sammelwinkel der Kollimationsoptik, zwischen 54 % und 70 %. Die Leuchtdichte kann durch diesen Ansatz bei einem Sammelwinkel von  $\pm 80^\circ$  um den Faktor 1,7 erhöht werden, während die Effizienz aufgrund der zweifachen elektrischen Leistung um einen Faktor von 0,85 abnimmt.

### 4.2.3 EXPERIMENT

Für den experimentellen Aufbau werden zwei OSRAM LEDs mit jeweils einer emittierenden Fläche von  $8,3 \text{ mm}^2$  verwendet. Die blaue LED (OSRAM LE B P2W) besitzt eine Spitzenwellenlänge von 448 nm. Sie kommt der LED gleich, die für die grüne Konversions-LED (OSRAM LE CG P2A) verwendet wird. Die gemessenen elektrooptischen Eigenschaften der beiden LEDs und die entsprechenden

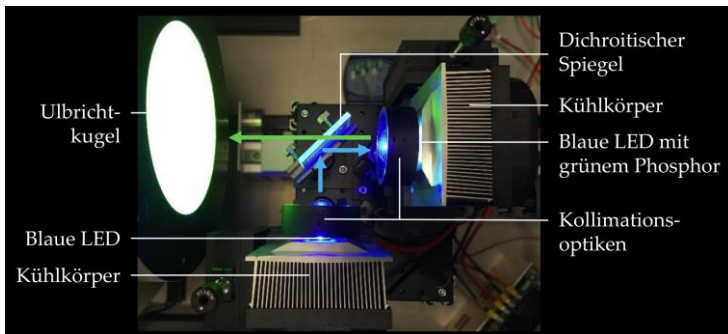
Betriebsbedingungen sind in Tabelle 4.3 angegeben. Die beiden aufgeführte Größen Spitzenlichtstrom und Spitzenstrahlungsleistung werden durch Division des gemessenen Lichtstroms bzw. Strahlungsflusses durch das Tastverhältnis bestimmt.

**Tabelle 4.3:** Messergebnisse der beiden im Experiment verwendeten LEDs.

	<b>Grüne LED</b>	<b>Blaue LED</b>
Leuchtfläche	8,3 mm <sup>2</sup>	8,3 mm <sup>2</sup>
Stromstärke	24 A	24 A
Durchlassspannung	3,49 V	3,41 V
Frequenz	1000 Hz	1000 Hz
Tastgrad	0,5	0,5
Kühlkörpertemperatur	40 °C	40 °C
Spitzenwellenlänge	523 nm	448 nm
Dominante Wellenlänge	552 nm	453 nm
Spitzenlichtstrom	7888 lm	688 lm
Spitzenstrahlungsleistung	17,9 W	22,4 W

Die beiden LEDs werden auf passenden, aktiv gekühlten Kühlkörpern montiert, die Wärmeströme von bis zu 100 W an die Umgebung abgeben können. Die Temperatur der Kühlkörper wird während der Messungen aufgezeichnet. Die LEDs werden mit einem Treiber (OSRAM RAPCUR F9632D) versorgt, der pro Kanal Stromstärken von bis zu 32 A bereitstellen kann, bei einer Frequenz von 1000 Hz. Die Stromstärken und Tastgrade können per Software unabhängig voneinander eingestellt werden.

Die verwendete Kollimationsoptik stammt aus einer Beleuchtungseinheit eines LED-Projektors und wurde in einem speziell angefertigten Gehäuse montiert. Die Optik besitzt einen Einfangwinkel von etwa  $60^\circ$ . Der verwendete dichroitische Spiegel (Edmund Optics  $45^\circ$  Magenta Dichroic Filter) hat seine Filterkanten bei 495 nm und 605 nm. Der Abstand zwischen dem Eingang der Kollimationsoptik und dem Filter wurde auf 65 mm fixiert. Während des Betriebs wurde der Abstand der LEDs zum entsprechenden Linsenpaar optimiert, um den Lichtstrom am Ausgang zu maximieren. Die spektralen Charakteristika werden am Ausgang (nach dem dichroitischen Spiegel) mithilfe einer Ulbrichtkugel ( $\varnothing$  500 mm) und einem Spektrometer der Firma Instrument Systems ermittelt. Ein Foto des experimentellen Aufbaus ist in Abbildung 4.15 gezeigt.



**Abbildung 4.15:** Foto des experimentellen Aufbaus.

#### 4.2.4 MESSERGEBNISSE

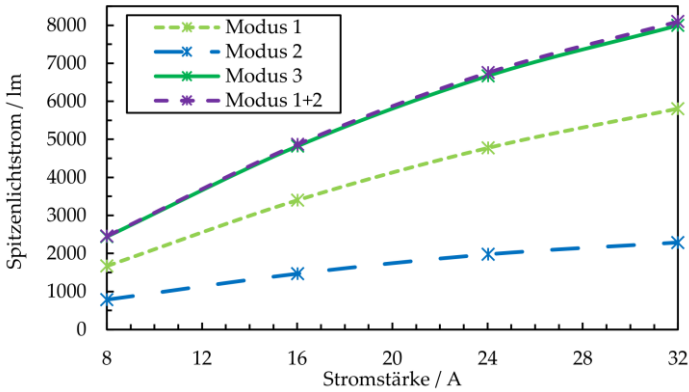
Die Strahlungsleistung und der Lichtstrom werden bei verschiedenen Stromstärken zwischen 8 und 32 A bei einem Tastgrad von 50 % und

einer Frequenz von 1000 Hz gemessen. Die Lüfter der Kühler werden mit voller Leistung angesteuert, um die LEDs möglichst effizient zu betreiben. Die Messungen werden durchgeführt, nachdem die Kühlkörpertemperatur einen konstanten Wert erreicht hat. Während des Betriebs werden ausschließlich Werte unterhalb von 31 °C ermittelt. Die beiden LEDs können unabhängig voneinander betrieben werden, daher können die Messungen in verschiedenen Modi durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Messungen sind in der folgenden Tabelle 4.4 zusammengefasst.

**Tabelle 4.4:** Drei verschiedene Betriebsmodi für die grüne und blaue LED während der Messungen.

<b>Betriebsmodus</b>	<b>Grüne LED</b>	<b>Blaue LED</b>
Modus 1	Ein	Aus
Modus 2	Aus	Ein
Modus 3	Ein	Ein

In Modus 1 und 2 werden die LEDs einzeln angesteuert, während die LEDs in Modus 3 gleichzeitig und synchronisiert betrieben werden. Die gemessenen Spitzenlichtströme der verschiedenen Betriebsmodi sind in Abbildung 4.16 gezeigt. Hier ist außerdem die Summe der Modi 1 und 2 aufgetragen, um den Vergleich mit dem Modus 3 zu ermöglichen.



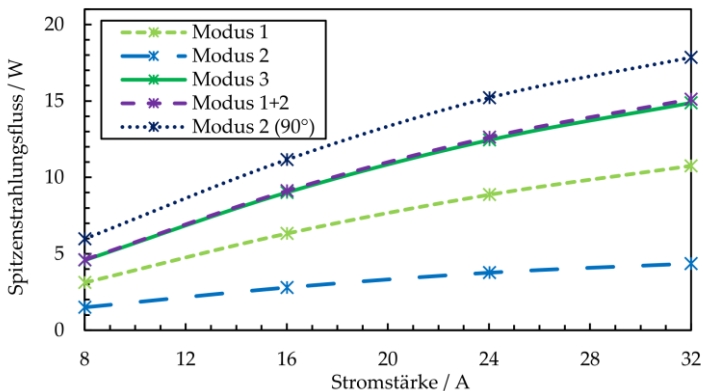
**Abbildung 4.16:** Gemessene Spitzenlichtströme am Ausgang des Aufbaus in Abhängigkeit der Stromstärke bei einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastgrad von 0,5.

Die spektralen Messdaten der Strahlung am Ausgang sind in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebsmodus in Tabelle 4.5 aufgelistet. Da sich die Messwerte im untersuchten Strombereich nicht signifikant unterscheiden, sind lediglich die Werte für eine Stromstärke von 32 A aufgezeigt.

**Tabelle 4.5:** Gemessene Spektraldaten der Strahlung am Ausgang des Aufbaus bei einer Stromstärke von 32 A.

	Modus 1	Modus 2	Modus 3
Spitzenwellenlänge	528,0 nm	526,7 nm	528,5 nm
Dominante Wellenlänge	557,7 nm	556,5 nm	557,6 nm
CIE 1931 x	0,354	0,345	0,353
CIE 1931 y	0,607	0,588	0,601

Die ermittelten Werte der Spitzenstrahlungsleistung in Abhängigkeit der angelegten Stromstärke sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Durch die Werte „Modus 2 (90°)“ sind zudem die Strahlungsleistungen der blauen LED nach dem dichroitischen Filter aufgetragen, also bevor die Strahlung auf das zweite Linsenpaar trifft. Diese Werte können im Aufbau durch das Verdrehen des dichroitischen Spiegels um 90° gemessen werden.



**Abbildung 4.17:** Gemessene Spitzenstrahlungsleistungen am Ausgang des Aufbaus in Abhängigkeit der Stromstärke bei einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastgrad von 0,5.

Der Lichtstrom und die Strahlungsleistung nehmen bei allen drei Betriebsmodi kontinuierlich zu. Die Werte im Modus 1 steigen von 1670 lm/3,11 W bei 8 A über 4780 lm/8,86 W bei 24 A bis 5810 lm/10,76 W bei 32 A. Die elektrische Spitzenleistung der grünen LED beträgt hierbei 116 W. Die blaue LED verursacht Lichtströme/Strahlungsleistungen von 790 lm/1,50 W bei 8 A, 1980 lm/3,76 W bei 24 A und 2290 lm/4,36 W bei 32 A. Werden beide LEDs synchron

betrieben, werden bei 8 A Werte von 2440 lm/4,58 W erreicht, bei 24 A werden 6670 lm/12,44 W und bei 32 A 7990 lm/14,87 W gemessen. Die maximale elektrische Leistungsaufnahme liegt bei 231 W. Nach dem Verdrehen des dichroitischen Spiegel um 90° betragen die Strahlungsleistungen 5,89 W bei 8 A, 15,21 W bei 24 A und 17,85 W bei 32 A.

### 4.2.5 DISKUSSION

Bei Stromdichten zwischen 2 und 4 A/mm<sup>2</sup> sorgt die zusätzliche blaue LED für eine Zunahme des Lichtstroms um 38 % bis 42 %. Innerhalb dieses Stromdichtebereichs ist die spektrale Verteilung der blauen LED näherungsweise konstant. Bei einer niedrigeren Stromdichte von 1 A/mm<sup>2</sup> kann eine höhere Zunahme um 46 % beobachtet werden. Dieses Verhalten ist vermutlich auf die spektrale Verschiebung der blauen LED hin zu längeren Wellenlängen und die starke Wellenlängenabhängigkeit des dichroitischen Spiegels zurückzuführen.

Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17 zeigen deutlich, dass sich die gemessenen Lichtströme und Strahlungsleistungen im Modus 3 und die Summe der Modi 1 und 2 nahezu gleichen. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messunsicherheit. Folglich kann daraus geschlossen werden, dass die zusätzliche Strahlungsleistung im untersuchten Strombereich keine zusätzlichen Sättigungs- oder Quenchingeffekte im Konverter hervorruft.

Aus den Messergebnissen lässt sich ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,4 ausmachen, der deutlich unter dem zuvor ermittelten Wert von 1,54 liegt. Eine der Ursachen hierfür ist die geringere Reflektivität des dichroitischen Filters für die Strahlung der blauen LED. Während 98 %

angenommen wurden, konnte im System nur ein Reflexionsgrad von etwa 96 % ausgemacht werden.

Die Farborte, die während der verschiedenen Betriebsmodi am Ausgang des experimentellen Aufbaus gemessen wurden, zeigen weitere Auffälligkeiten. Es kann festgestellt werden, dass die Strahlung, die durch die Anregung von der Oberseite erzeugt wurde, einen deutlich bläulichen Farbort aufweist, als die Strahlung der Konverter-LED. Hieraus lässt sich ableiten, dass der Teil des blauen Lichts, der in grünes umgewandelt wird, deutlich geringer als erwartet ist. Das Ausmaß dieses Effekts wird insbesondere deutlich bei der Berücksichtigung der geringen Durchlässigkeit des dichroitischen Filters für blaues Licht von rund 4 %. Der hohe Blauanteil kann durch Reflexionen des blauen Lichts an den Flächen um den Konverter herum verursacht werden. Weiterhin kann die geometrische Effizienz von 90 % im Experiment nicht erreicht werden. Eine Anpassung des Simulationsmodells an die Geometrien des experimentellen Aufbaus lässt darauf schließen, dass hier lediglich 70 % erreicht werden können. Dieser Wert stimmt gut mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Um eine praktische Anwendbarkeit des Konzepts zu gewährleisten, müssen die Auswirkungen des zusätzlichen blauen Lichts auf die Konverter-LED evaluiert werden. Das Konverterplättchen, der darunter liegende LED-Chip und das LED-Gehäuse werden aufgrund der blauen Strahlung zusätzlich belastet. Aus diesem Grund soll die Zuverlässigkeit des Konzepts im Folgenden durch eine Langzeiterprobung überprüft werden.



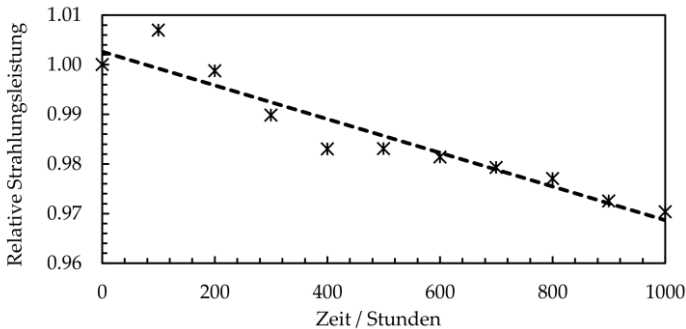
### 4.2.6 ZUVERLÄSSIGKEIT

Thermische Simulationen des LED-Packages zeigen, dass sowohl die Temperatur des Konverters, als auch die der Sperrschicht des LED-Chips ansteigen. Diese Temperaturerhöhung beträgt bei einer zusätzlichen Strahlungsleistung auf das Konverterplättchen von 25 W bei einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastgrad von 50 % im Konverter neun Kelvin und in der Sperrschicht vier Kelvin [54]. Diese Temperaturerhöhungen sind bei der Auslegung des Systems zu berücksichtigen. Solange die LED unterhalb der Höchsttemperatur von 125 °C [55] betrieben wird, sind thermische Probleme nicht zu erwarten.

Trotzdem kann die zusätzliche kurzwellige Strahlung Einflüsse auf den Konverter und das LED-Gehäuse haben. Aus diesem Grund werden zwei neue Bauteile in dem Aufbau 1000 Stunden lang betrieben. Während des synchronen Betriebs der beiden LEDs bei einer Stromstärke von 32 A, einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastverhältnis von 50 %, wird die relative Strahlungsleistung am Ausgang des Aufbaus aufgenommen. Hierzu wird ein Detektor mit einer Photodiode (Thorlabs PM16-121) verwendet. Dieser soll Fehlerfälle während der Laufzeit kurzfristig erkennbar machen. Zusätzlich werden die Kühlkörpertemperatur der grünen LED und die Raumtemperatur protokolliert. Eine Messung der Bauteile vor und nach dem Dauerversuch soll entsprechende Veränderungen der Bauteile aufzeigen.

Die Messwerte der relativen Strahlungsleistung sind in Abbildung 4.18 grafisch dargestellt. Die Temperatur des Kühlkörpers der grünen LED

lag bei  $37,5 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Raumtemperatur betrug während des gesamten Zeitraums  $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Abbildung 4.18:** Gemessene relative Strahlungsleistung am Ausgang des Konzeptaufbaus über einen Zeitraum von 1000 Stunden.

Die relative Strahlungsleistung des Konzeptaufbaus nimmt über einen Zeitraum von 1000 Stunden um etwa 3 % ab. Die geringen Schwankungen während der Laufzeit liegen im Bereich der Messgenauigkeit des verwendeten Messsystems.

Die Ergebnisse der Messungen der beiden LEDs außerhalb des Konzeptaufbaus bei einer Betriebsdauer von null und 1000 Stunden sind in Tabelle 4.6 (grüne LED) und Tabelle 4.7 (blaue LED) aufgelistet.

**Tabelle 4.6:** Eigenschaften der grünen LED vor und nach 1000 Stunden Betrieb im Konzeptaufbau gemessen bei einer Frequenz von 1000 Hz, einem Tastgrad von 0,5 und einer Kühlkörpertemperatur 25 °C.

<b>Betriebszeit</b>	<b>0 Std.</b>	<b>1000 Std.</b>
Leuchtfläche	8,3 mm <sup>2</sup>	8,3 mm <sup>2</sup>
Stromstärke	24 A	24 A
Vorwärtsspannung	3,39 V	3,45 V
Spitzenwellenlänge	519 nm	519 nm
Dominante Wellenlänge	552 nm	552 nm
Spitzenlichtstrom	8393 lm	8411 lm
Spitzenstrahlungsfluss	18,8 W	18,9 W

**Tabelle 4.7:** Eigenschaften der blauen LED vor und nach 1000 Stunden Betrieb im Konzeptaufbau gemessen bei einer Frequenz von 1000 Hz, einem Tastgrad von 0,5 und einer Kühlkörpertemperatur 25 °C.

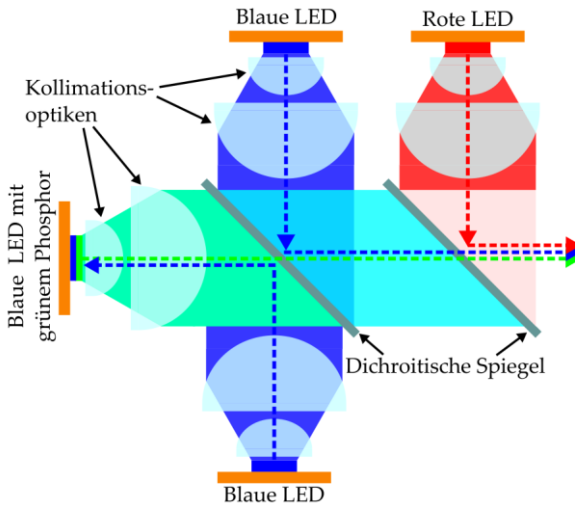
<b>Betriebszeit</b>	<b>0 Std.</b>	<b>1000 Std.</b>
Stromstärke	24 A	24 A
Vorwärtsspannung	3,40 V	3,48 V
Spitzenwellenlänge	447 nm	447 nm
Dominante Wellenlänge	452 nm	452 nm
Spitzenstrahlungsfluss	22,3 W	21,3 W

Den Messergebnissen ist zu entnehmen, dass die grüne Konverter-LED keine Veränderungen in ihren optischen Charakteristika zeigt. Sämtliche Unterschiede liegen innerhalb der Messunsicherheit des Messaufbaus. Die blaue LED zeigt bei sonst konstanten Eigenschaften nach 1000 Stunden eine Abnahme der Strahlungsleistung um circa 4 %, was im Bereich der typischen Degradation der blauen LED liegt.

Die Messungen am Konzeptaufbau und an den LEDs zeigen sehr ähnliche Ergebnisse mit lediglich marginalen Abweichungen. Hieraus ist zu schließen, dass die grüne Konverter-LED unter den geprüften Bedingungen den zusätzlichen Belastungen standhält, die durch intensive Bestrahlung einer blauen LED induziert werden. Daher wird davon ausgegangen, dass die Anwendung des Konzepts die Zuverlässigkeit der grünen LED nicht beeinflusst.

#### **4.2.7 ANWENDUNGSBEISPIEL**

Das vorgeschlagene Konzept kann ohne schwerwiegende Modifikationen in das System integriert werden. Die zusätzliche blaue LED kann auf der freien Seite des bereits vorhandenen dichroitischen Spiegels platziert werden, der die Strahlung des grünen und des blauen Farbkanals überlagert. Hierdurch wird der optische Pfad der vorhandenen LEDs nicht beeinflusst. Diese Möglichkeit der Integration in eine bestehende Beleuchtungseinheit eines Projektors ist in Abbildung 4.19 dargestellt.



**Abbildung 4.19:** Möglichkeit der Umsetzung des Konzepts in eine Beleuchtungseinheit eines LED-Projektors.

## 4.2.8 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurde ein neuartiges Konzept vorgestellt, das dem Zweck dient, die Leuchtdichte einer Konverter-basierten grünen LED zu erhöhen. Hierzu wurde eine weitere blaue LED verwendet, die den grünen Leuchtstoff zusätzlich von der Oberseite anregte. Der entsprechende Versuchsaufbau war in der Lage, Strahlung zu erzeugen, die innerhalb eines geringen Divergenzwinkels einen Lichtstrom von etwa 8000 lm erzeugte. Die effektive Fläche der Lichtquelle betrug 8,3 mm<sup>2</sup> und die aufgenommene Spitzenleistung des Systems 231 W. Der innerhalb des experimentellen Aufbaus erreichte Verstärkungsfaktor der Leuchtdichte betrug 1,4. Das Versuchssystem besaß neben den beiden Höchstleistungs-LEDs einen

dichroitischen Spiegel und Linsen, die die Strahlung der LEDs aufnehmen und kollimierten. Der Versuchsaufbau wurde außerdem dazu verwendet, die Zuverlässigkeit des Konzepts zu prüfen. Nach einer Betriebszeit von 1000 Stunden konnten keine Veränderungen außerhalb der üblichen Alterung der Bauteile festgestellt werden.

Das aufgezeigte Konzept kann in bestehende Projektortopologien integriert werden, ohne schwerwiegende Veränderungen vornehmen zu müssen. Die Erhöhung der Leuchtdichte um 40 % geht einher mit einer Verringerung der Effizienz um einen Faktor von 0,3. Es ist zu erwarten, dass weitere Optimierungen am optischen Pfad durch Anpassungen an den optischen Elementen zu Erhöhungen zwischen 60 % und 70 % führen können, wodurch die Effizienz des Systems ebenfalls verbessert werden kann.

Das Konzept kann prinzipiell auf alle LEDs angewendet werden, die nach dem Prinzip der Konversion von kurzwelliger in langwelligere Strahlung funktionieren. Somit wäre auch ein Aufbau denkbar, der die Leuchtdichte einer gelben Konverter-LED erhöht. Durch eine Überlagerung mit blauem Licht könnte eine weiße Lichtquelle mit einer hohen Leuchtdichte generiert werden. Diese könnte beispielweise in Projektoren verwendet werden, die vorzugsweise konstantes, weißes Licht verwenden.

### **4.3 ANSÄTZE FÜR DEN ROTEN FARBKANAL**

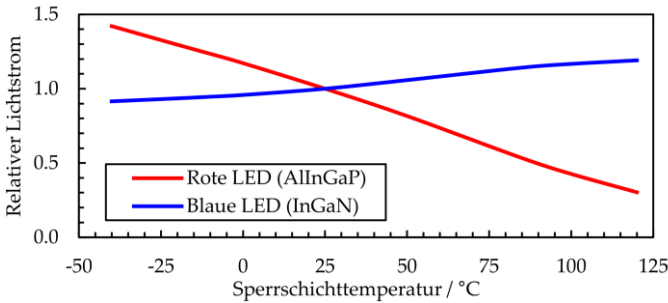
Bisher wurden in dieser Arbeit lediglich Ansätze aufgezeigt, die die Leuchtdichten des grünen und des blauen Farbkanals im LED-

Projektionssystem beeinflussen können. Diese Konzepte konnten jedoch nicht auf den roten Farbkanal angewendet werden. Daher wird dieser in dem folgenden Abschnitt separat untersucht und Methoden zu seiner Verbesserung entwickelt.

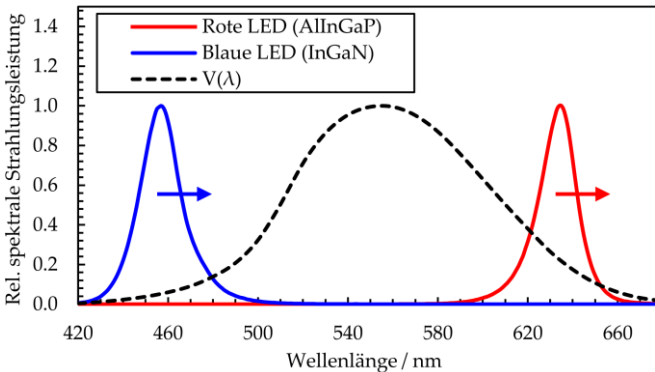
### **4.3.1 BESONDERHEITEN DER ROTEN ALINGAP-LED**

Die roten LEDs, die auf dem AlInGaP-Materialsystem basieren, unterscheiden sich in ihrem thermischen Verhalten stark von den blauen InGaN-LEDs. Die blauen LEDs besitzen bei einer Sperrschichttemperatur von 120 °C noch 92 % der Strahlungsleistung, die bei 25 °C emittiert wird [56]. Hierbei verschiebt sich außerdem die Spitzenwellenlänge in Richtung längerer Wellenlängen [43]. Betrachtet man den photometrischen Lichtstrom über die Temperatur, wird der Abfall in der Strahlungsleistung durch die Zunahme der Augenempfindlichkeit überkompensiert und der Wert steigt mit höheren Temperaturen. Die Strahlungsleistung und der Lichtstrom der roten LEDs sind hingegen deutlich empfindlicher gegenüber höheren Temperaturen. Die spektrale Verteilung verschiebt sich ebenfalls in Richtung längerer Wellenlängen. Die Augenempfindlichkeit nimmt jedoch ab, wodurch sich der Lichtstrom mit höheren Temperaturen nochmals stärker reduziert als die Strahlungsleistung. Bei einer Temperatur von 120 °C in der Sperrschicht der LED werden, verglichen mit dem Wert bei 25 °C, nur noch 30 % des Lichtstroms abgegeben.

Das beschriebene Verhalten der roten und blauen LEDs ist in Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 visualisiert. Die Daten basieren auf LEDs, die bei 25 °C eine Spitzenwellenlänge von 634 nm (rot) und 457 nm (blau) besitzen.



**Abbildung 4.20:** Verhalten des Lichtstroms in Abhängigkeit der Sperrschichttemperatur roter (AlInGaP-) und blauer (InGaN-)LEDs.



**Abbildung 4.21:** Verschiebung der spektralen Verteilungen der roten (AlInGaP) und blauen (InGaN) LED bei steigenden Sperrschichttemperaturen.



Unter Berücksichtigung dieser besonderen Eigenschaften werden im Folgenden Methoden entwickelt, die im Speziellen die Leuchtdichte des roten Farbkanals steigern sollen.

### 4.3.2 ROTER LEUCHTSTOFF

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob eine rote Konverter-LED, die einen aktuellen Leuchtstoff enthält, der im roten Wellenlängenbereich emittiert, innerhalb eines LED-Projektionssystems ähnliche Lichtstromwerte erreichen kann, wie eine rote AlInGaP-LED. Diese Herangehensweise ist analog zu dem Ansatz, der bereits starke Verbesserungen innerhalb des grünen Farbkanals erzielte.

#### 4.3.2.1 FUNKTIONSPRINZIP

Im Folgenden werden blaue LEDs untersucht, auf deren Chip keramische Konverterplättchen aufgebracht werden. Diese sollen möglichst die gesamte Strahlung der LED-Chips aufnehmen und in rotes Licht mit Wellenlängen oberhalb von 590 nm umwandeln. Hierbei werden zum einen Leuchtstoffe betrachtet, die vorwiegend im roten Spektralbereich emittieren, wie beispielsweise  $(\text{Ca,Sr,Ba})_2\text{Si}_5\text{N}_8\text{:Eu}$  [33]. Zum anderen werden Leuchtstoffe einbezogen, die vorwiegend im gelben Spektralbereich emittieren, wie zum Beispiel Cer-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{:Ce}$ , YAG:Ce) [33]. Diese gelben Konverter weisen ein geringeres thermisches Einschnürverhalten als die roten Phosphore auf [39]. Da die Verwendung eines dichroitischen Filters aufgrund der Projektor-

topologie obligatorisch ist, stellt die spektrale Breite der Leuchtstoffe für das Erreichen des geforderten Farbraums kein Problem dar.

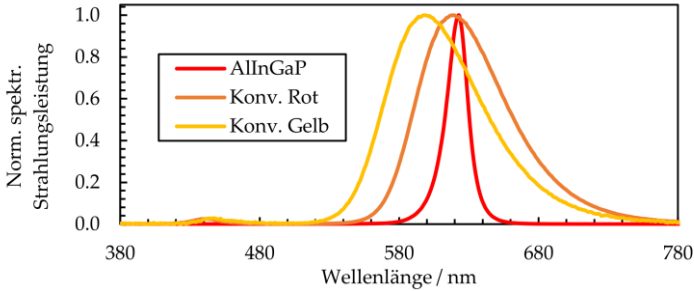
Die Verwendung von Konverter-LEDs könnte sich positiv auf den Lichtstrom des roten Farbkanals auswirken. Insbesondere die höhere Temperaturstabilität der InGaN-Chips und der Konverter könnte unter Anwendungsbedingungen bei erhöhten Temperaturen einen Vorteil gegenüber direkten AlInGaP-LEDs haben.

Folgend werden Konverter-LEDs elektro-optisch bei erhöhten Temperaturen vermessen, die mit verschiedenen keramischen Konverter versehen wurden. Zum Vergleich werden entsprechende AlInGaP-Bauteile unter gleichen Bedingungen charakterisiert.

#### 4.3.2.2 EXPERIMENTELLE MESSUNGEN

Die Messungen werden an LEDs durchgeführt, die auf OSRAM Projektions-LEDs des Typs OSTAR Projection Power LE CG P1A basieren [57]. Diese besitzen zwei dicht nebeneinanderliegende blaue LED-Chips mit jeweils einer Fläche von 2 mm<sup>2</sup>. Im Rahmen der folgenden Versuche werden die LEDs, anstatt mit den vorgesehenen grünen Konverterplättchen, mit Leuchtstoffkeramiken bestückt, die orange-gelbes Licht (Konverter Gelb) oder orange-rotes Licht (Konverter Rot) abstrahlen. Die Vergleichsbasis bildet eine aktuelle AlInGaP-LED der gleichen Gehäuseplattform (OSRAM LE A P1W). Diese stammt aus der mittleren Helligkeitsgruppierung (RY, vgl. [40]) und entspricht dem aktuellen Stand der Technik roter Höchstleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen.

Zunächst werden die spektralen Eigenschaften der drei LED-Typen bei 25 °C bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.22 zu betrachten.



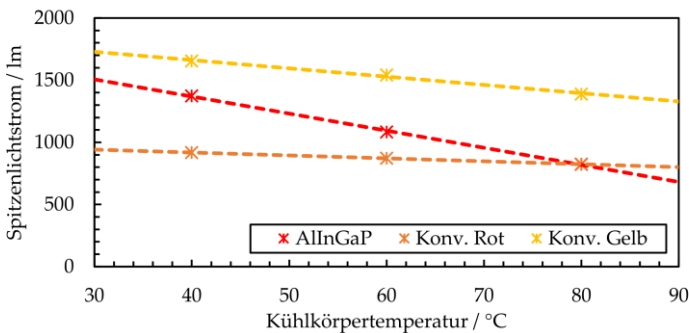
**Abbildung 4.22:** Spektrale Verteilungen der drei verschiedenen LED-Typen bei einer Temperatur von 25 °C.

Die spektralen Verteilungen der drei Varianten unterscheiden sich deutlich. Die beiden Konverter-LEDs besitzen wesentlich breitere Spektralverteilungen als die direkte rote LED. Während die Spitzenwellenlängen des roten Konverters und der direkten LED im Bereich von 620 nm nur wenig differieren, liegt die Spitzenwellenlänge des gelben Konverters bei einer deutlich kürzeren Wellenlänge von 598 nm. Die spektralen Eigenschaften der drei LED-Typen sind in Tabelle 4.8 zusammenfassend aufgelistet.

**Tabelle 4.8:** Spektrale Eigenschaften der gemessenen LEDs bei einer Temperatur von 25 °C.

	<b>AlInGaP</b>	<b>Konv. Rot</b>	<b>Konv. Gelb</b>
Spektrale Breite	18 nm	74 nm	79 nm
Spitzenwellenlänge	623 nm	619 nm	598 nm

Die Lichtströme der LEDs werden bei verschiedenen Stromstärken und Kühlkörpertemperaturen ermittelt. Die Messwerte der verschiedenen LEDs werden bei einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastverhältnis von 40 % in Abhängigkeit der Kühlkörpertemperatur ermittelt. Das entsprechende Diagramm ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Hier werden die Daten bei einer Stromstärke von 16 A visualisiert, da hierbei jeweils die maximalen Lichtströme erreicht werden.



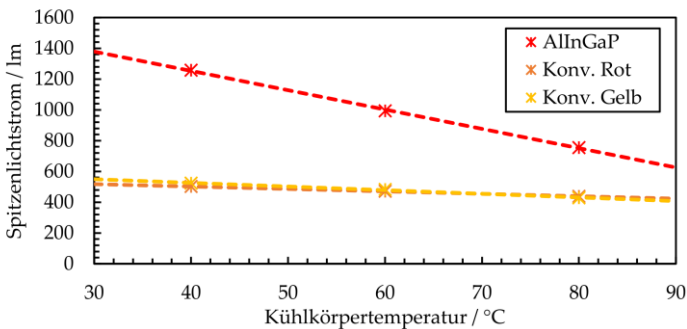
**Abbildung 4.23:** Gemessene Lichtströme der aufgebauten LED-Typen in Abhängigkeit der Kühlkörpertemperatur bei einer Stromstärke von 16 A.

Die rote AllInGaP-LED weist bei 40 °C einen Spitzenlichtstrom von 1374 lm auf. Dieser reduziert sich bei 60 °C auf 1084 lm und bei 80 °C auf 824 lm. Die rote Konverter-LED emittiert bei 40 °C einen Lichtstrom von 917 lm, der bei 60 °C auf 873 lm absinkt und bei 80 °C einen Wert von 823 lm annimmt. Die Werte der gelben Konverter-LED liegen aufgrund ihres Spektralanteils im gelb-grünen Wellenlängenbereich und der damit verbundenen höheren Lichtausbeute deutlich darüber.

Bei 40 °C liegt der Wert bei 1655 lm, bei 60 °C bei 1542 lm und bei einer Kühlkörpertemperatur von 80 °C bei 1389 lm.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Lichtströme der gelben und roten Konverter-LED mit steigender Temperatur geringfügig absinken, während die Werte der AlInGaP-LED stark zurückgehen. Bei einer Kühlkörpertemperatur von 80 °C besitzen die rote Konverter-LED und die AlInGaP-LED etwa gleiche Lichtströme, während die gelbe Konverter-LED die Werte deutlich übersteigt.

Um die effektiven Lichtströme zu ermitteln, die in der Anwendung wirken, werden die spektralen Messdaten mit einem idealisierten Langpassfilter verrechnet, der seine Grenzwellenlänge bei 600 nm hat. Die berechneten Werte der effektiven Lichtströme sind im Diagramm in Abbildung 4.24 skizziert.



**Abbildung 4.24:** Effektive Lichtströme der aufgebauten LED-Typen nach der Verrechnung mit einem Langpass-Filter bei einer Wellenlänge von 600 nm.

Die Berücksichtigung des Filters bei 600 nm resultiert in niedrigeren Lichtstromwerten. Während der Lichtstrom der schmalbandigen

direkten roten LED nach dem Filter noch etwa 92 % des Wertes vor dem Filter aufweist (40 °C: 1257 lm, 60 °C: 994 lm, 80 °C: 755 lm), reduzieren sich die Lichtströme der roten bzw. gelben Konverter-LED auf 54 % (40 °C: 501 lm, 60 °C: 470 lm, 80 °C: 439 lm) bzw. 31 % (40 °C: 524 lm, 60 °C: 483 lm, 80 °C: 429 lm).

Die breiten spektralen Verteilungen der beiden Konverter-LEDs führen dazu, dass große Teile der emittierten Strahlung aufgrund des Filters nicht mehr genutzt werden können. Die Lage und die etwas geringere Breite des Spektrums des roten Konverters haben einen signifikanten Vorteil gegenüber dem gelben. Dennoch sind auch hier die Verluste aufgrund des Filters signifikant höher als bei der schmalbandig emittierenden AlInGaP-LED.

Die aufgezeigten Daten zeigen deutlich, dass sich die effektiven Lichtströme der Konverter-LEDs über den gesamten Strombereich unterhalb der Lichtströme der direkten roten LED befinden. Die Lichtströme nach dem Langpassfilter sind zwar über den betrachteten Temperaturbereich deutlich konstanter, jedoch reichen die absoluten Werte nicht an die der direkten AlInGaP-LED heran. Weiterhin ist zu beobachten, dass die gelbe Konverter-LED trotz der größeren Breite ihres Spektrums und der ungünstigeren Spitzenwellenlänge nahezu identische Lichtströme nach dem Filter liefert wie die rote Konverter-LED. Dies könnte beispielweise durch eine geringere Quanteneffizienz des roten Leuchtstoffs oder in einer geringeren Strahlungsleistung der anregenden blauen LED begründet sein. Die Unterschiede der Verluste aufgrund der Stokes Verschiebung sind gering (rot: 30 %, gelb: 27 %). Auch die die relativen Lichtströme in Abhängigkeit der Kühlkörpertemperatur und der angelegten Stromstärke zeigen lediglich marginale

Unterschiede auf. Daher kann hier nicht auf ein erhöhtes Temperaturquenching geschlossen werden. Auch ein verringerter Absorptionsgrad des Konversionsmaterials ist aufgrund ähnlicher Reststrahlungsanteile im blauen Wellenlängenbereich unwahrscheinlich.

Die generierten Ergebnisse zeigen, dass die aufgebauten Konverter-LEDs zwar gegenüber steigenden Temperaturen stabilere Lichtströme aufweisen, dennoch erreichen diese selbst bei hohen Temperaturen nicht die Werte einer aktuellen AlInGaP-LED. Daher kann konkludiert werden, dass sich diese Konverter nicht für den Einsatz in Projektionsanwendungen eignen.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass andere Leuchtstoffe existieren oder entwickelt werden können, die verbesserte Eigenschaften aufweisen und aufgrund dessen höhere Lichtströme erzeugen können. Um das Verbesserungspotential roter Konverter abschätzen zu können, werden folgend an dem gemessenen roten Konverter theoretische Optimierungen durchgeführt. Diese sollen Aufschluss darüber geben, ob rote Konverter-LEDs grundsätzlich für LED-Projektionsanwendungen geeignet sind.

##### 4.3.2.3 THEORETISCHE OPTIMIERUNGEN

Die Basis der folgenden theoretischen Optimierungen bildet eine blaue InGaN-LED, deren Strahlung durch einen Konverter in langwelligeres Licht umgewandelt wird. Hierzu können Messergebnisse einer aktuellen Höchstleistungs-LED (OSRAM LE B P1W) aus der mittleren Helligkeitsgruppe (FX, vgl. [56]) mit einer Spitzenwellenlänge von

448 nm bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C, einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastverhältnis von 0,4 herangezogen werden. Bei der Umwandlung verursachen verschiedene Vorgänge eine Reduktion der Strahlungsleistung. Zu diesen Mechanismen gehören die Stokes Verschiebung, ein limitierter Absorptionsgrad und eine begrenzte Quanteneffizienz des Konverters sowie auftretendes Quenching, verursacht durch erhöhte Temperaturen innerhalb des Materials während des Betriebs. Während die Verluste aufgrund der Stokes Verschiebung durch das anregende und emittierte Spektrum zwangsläufig vorgegeben sind, können die weiteren Verluste unter optimalen Bedingungen sehr gering ausfallen. Für die Untersuchung werden eine Quanteneffizienz von 0,9 und ein Absorptionsgrad sowie ein Quenching-Faktor von jeweils 0,95 angenommen. Der Stokes-Faktor wird jeweils abhängig von der spektralen Verteilung des Konverters bestimmt.

Das Ziel der Optimierung ist das Maximieren des erreichbaren photometrischen Lichtstroms. Bei der Optimierung der spektralen Verteilung spielt daher der vorhandene Langpassfilter bei 600 nm eine wichtige Rolle, da dieser die maximal erreichbare Lichtausbeute limitiert. Gleichmaßen von Bedeutung ist die Augenempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$ . Ihre Werte sinken oberhalb von 590 nm stark ab, wodurch langwellige Spektralanteile den Lichtstromwert nur geringfügig beeinflussen.

Als Ausgangsbasis dient die zuvor experimentell bestimmte spektrale Verteilung der roten Konverter-LED bei 60 °C. Dieses Spektrum kann durch das in Abschnitt 3.2.1 gestellte Modell nachgebildet werden,

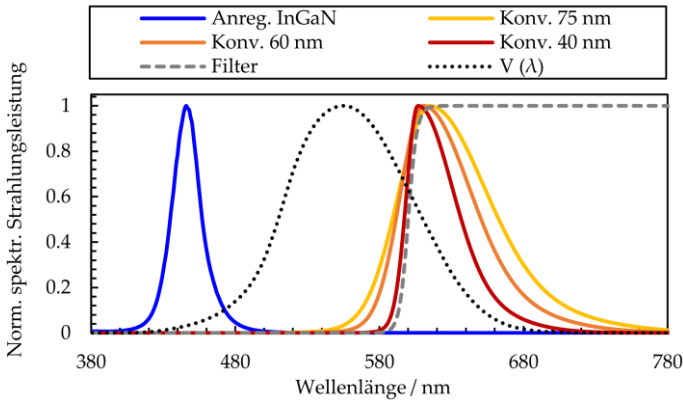


welches eine Veränderung der Spitzenwellenlänge und der spektralen Breite zulässt.

Aus diesem Modell kann durch die Gewichtung mit der Strahlungsleistung der blauen LED und das Einbeziehen der Verlustmechanismen die Strahlungsleistung des Konverter-LED-Modells berechnet werden. Werden zudem die Filterfunktion und das spektrale photometrische Strahlungsäquivalent  $K(\lambda)$  einbezogen, kann hieraus der effektive Lichtstrom des Modells ermittelt werden. Die beschriebene Berechnung wird im Anhang A.1 dieser Arbeit aufgezeigt. Durch das aufgezeigt Berechnungsverfahren kann die Lage des Spektrums ermittelt werden, die den größten Lichtstrom zur Folge hat.

Diese Optimierung wird jeweils für drei verschiedene Halbwertsbreiten des Konverterspektrums durchgeführt und der resultierende Lichtstrom berechnet. Die modellierten spektralen Verteilungen mit optimierten Spitzenwellenlängen und einer Halbwertsbreite von 75 nm, 60 nm und 40 nm sind in Abbildung 4.25 skizziert. Zudem sind das Spektrum der anregenden LED sowie die  $V(\lambda)$ -Kurve und die Kurve des Filtermodells dargestellt.

Die Optimierung ergab Peak-Wellenlängen von 615 nm für eine ursprüngliche spektrale Breite von 75 nm, 611 nm für eine Breite von 60 nm und 607 nm für eine Breite von 40 nm. Durch diese Verteilungen ergeben sich geringfügig unterschiedliche Stokes-Faktoren von 0,70 ( $\Delta\lambda = 75$  nm), 0,71 ( $\Delta\lambda = 60$  nm) und 0,72 ( $\Delta\lambda = 40$  nm). Die Transmissionsgrade des Filters erhöhen sich bei geringeren Halbwertsbreiten und liegen bei 0,60, 0,65 und 0,80.



**Abbildung 4.25:** Spektrale Verteilungen der optimierten Spektren theoretischer Rot-Konverter, der anregenden blauen InGaN-LED und dem verwendeten Langpassfilter.

Die Lichtstromwerte die sich aus der Modellrechnung ergeben und die zugrundeliegenden Strahlungsleistungen der blauen LED, sind für zwei verschiedene Stromstärken in der folgenden Tabelle 4.9 gegeben.

**Tabelle 4.9:** Berechnete Lichtströme optimierter Konverter-LEDs mit verschiedenen spektralen Breiten bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C, einer Frequenz von 1000 Hz und einem Tastverhältnis von 0,4.

		12 A	16 A
		<b>Strahlungsleistung</b>	
InGaN-LED (blau)		10,5 W	12,8 W
	$\Delta\lambda$	<b>Lichtstrom nach Filter</b>	
Konverter Rot	75 nm	809 lm	989 lm
Konverter Rot	60 nm	<b>965 lm</b>	<b>1180 lm</b>
Konverter Rot	40 nm	<b>1252 lm</b>	<b>1531 lm</b>
AlInGaP LED (rot)		879 lm	994 lm

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass der Lichtstrom der Konverter-LED mit einer Halbwertsbreite von 75 nm unter idealisierten Bedingungen bei 16 A knapp den Wert der AlInGaP-LED erreichen kann. Im effizienteren Arbeitspunkt der direkten LED bei 12 A liegt der Wert noch 8 % darunter. Bei einer geringeren Breite von 60 nm können unter den idealisierten Randbedingungen Zugewinne von 10 % bei 12 A und 19 % bei 16 A beobachtet werden. Eine weitere Reduktion der spektralen Breite auf 40 nm resultiert in Lichtstromwerten, die 42 % (12 A) bzw. 54 % oberhalb der Werte der direkten AlInGaP-LED liegen. Die erreichten Farborte liegen allesamt im gültigen Bereich des Rec.709-Farbraums.

#### 4.3.2.4 FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Teil der Arbeit wurden Messungen an roten und gelben Konverter-LEDs durchgeführt und mit einer aktuellen AlInGaP-LED verglichen. Zusätzlich wurde auf Basis dieser Messungen ein vereinfachtes Modell der roten Konverter-LED erstellt. Dieses war in der Lage, die spektrale Halbwertsbreite zu variieren und die Spitzenwellenlänge dahingehend zu optimieren, dass ein maximaler Lichtstrom in einem Projektionssystem generiert wird.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die real vermessenen Konverter-LEDs wesentlich geringere wirksame Lichtströme im System aufweisen, als die verglichene AlInGaP-LED. Es wurde zudem theoretisch dargelegt, dass auch ein nahezu ideales Konversionsverhalten des roten Leuchtstoffs und die Optimierung seiner Peak-Wellenlänge zu keinem Performancegewinn gegenüber der AlInGaP-

LED führt. Signifikante Zugewinne können durch die Verschmälerung des Konverterspektrums erzielt werden. Eine Verringerung der Breite von 75 nm auf 60 nm führt zu einem Anstieg des effektiven Lichtstroms um 19 %. Eine weitere Reduktion auf 40 nm resultiert in einer relativen Erhöhung um weitere 30 %. Diese Zunahme des Lichtstroms nach dem Filter ist sowohl auf höhere Filtertransmissionen als auch auf höhere Lichtausbeuten des gefilterten Spektrums zurückzuführen. Um folglich mit Konverter-LEDs signifikante Vorteile gegenüber direkten AlInGaP-LEDs in einem LED-Projektor zu erreichen, müssen die Leuchtstoffe stark in ihrer spektralen Breite reduziert werden.

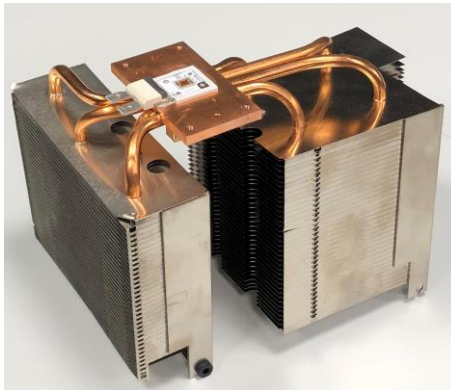
Das Potential dieser Technologie hängt also davon ab, in welchem Maß die Breite des Emissionsspektrums des Konverters eingeschränkt werden kann. Weiterhin ist die erreichbare Konversionseffizienz bei hohen Betriebstemperaturen von entscheidender Bedeutung. Sollten die Werte weit unterhalb des im Modell angenommenen Wertes von rund 57 % liegen, reduziert sich das Potential zunehmend.

Zu diesem Zeitpunkt liegt weder ein passendes Material vor, das die schwierigen Anforderungen eines LED-Projektionssystems erfüllen kann, noch kann die Umsetzbarkeit eines solchen bestätigt werden. Aus diesem Grund muss konkludiert werden, dass der Einsatz einer Konverter-LED für den roten Kanal eines LED-Projektors derzeit keine mögliche Alternative zu einer direkten roten AlInGaP-LED ist.

Aus diesem Grund wird in den folgenden beiden Abschnitten versucht, den Lichtstrom der AlInGaP-LEDs im System zu verbessern. Hierbei werden zwei verschiedene Ansätze untersucht, die die effektive Temperatur der aktiven Schicht der LED beeinflussen sollen, da dies eine unmittelbare Erhöhung des Lichtstroms zur Folge hat.

### 4.3.3 ERWEITERUNG DER KÜHLUNG DURCH EIN PELTIERMODUL

LEDs werden in aktuellen Projektionssystemen durch entsprechend ausgelegte Wärmesenken, vorwiegend aus Kupfer oder Aluminium, gekühlt. Je nach Anforderung werden sowohl Profil- als auch Lamellenkühlkörper eingesetzt. Aufgrund oftmals vorhandener Bauraumbeschränkungen kommen auch Wärmerohre (engl. heat pipes) zum Einsatz, die die Wärme zunächst vom Bauteil wegtransportieren, bevor diese an die Umgebung abgegeben wird. Häufig wird die natürliche Konvektion an den Oberflächen der Kühlkörper durch passende Axiallüfter unterstützt, die zudem einen Wärmestau im Gehäuse verhindern sollen. Der Kühlkörper einer roten 8,3 mm<sup>2</sup>-LED aus einem aktuellen Projektor ist in Abbildung 4.26 dargestellt.



**Abbildung 4.26:** Kühlkörper der roten LED eines aktuellen LED-Projektors (BenQ X12000).

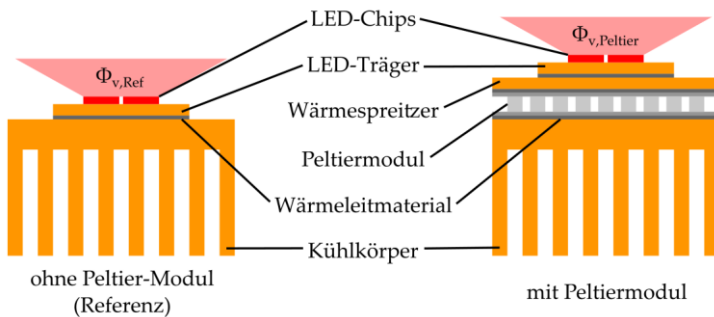
Zur Absenkung der Temperaturen der Sperrschicht der roten LED und um den abgegebenen Lichtstrom zu erhöhen, kann ein Peltiermodul verwendet werden. Die Auswirkungen der Verwendung eines solchen Moduls werden im Folgenden analysiert.

##### **4.3.3.1 KONZEPT**

Ein Peltiermodul (engl. thermoelectric cooler, abgekürzt TEC) besteht aus vielen miteinander verschalteten Peltierelementen und nutzt den Peltier-Effekt, um Wärme von seiner sogenannten kalten Seite (engl. cold side) zu entfernen und zu seiner sogenannten heißen Seite (engl. hot side) zu transportieren. Dies wird durch das Einprägen eines elektrischen Stroms bewirkt. Aufgrund des inneren ohmschen Widerstands des Peltiermoduls entsteht dabei zusätzliche Wärme. Eine passend ausgelegte Wärmesenke auf der heißen Seite des Moduls muss demzufolge die Summe der beiden Wärmeströme an die Umgebung ableiten.

Auf das Kühlsystem der roten LED angewendet bedeutet das, dass die gesamte Verlustleistung der LED auf der Kaltseite des Peltiermoduls aufgenommen und zusammen mit der anfallenden Verlustwärme des Peltiermoduls auf der Heiseite an die Umgebung abgeführt werden muss. Folglich wird hierzu eine verbesserte Wärmesenke benötigt. Da zudem die Leistungsfähigkeit des Peltiermoduls mit einer steigenden Temperaturdifferenz zwischen seiner Heiß- und Kaltseite stark abnimmt, sollte auf der Heiseite eine möglichst performante Wärmesenke mit einem geringen effektiven thermischen Widerstand verwendet werden.

Im Folgenden werden Ersatzmodelle der roten LED und des Peltiermoduls dazu verwendet, den potentiellen Zugewinn bei der Verwendung eines Peltiermoduls zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden die relativen Lichtströme der Gesamtmodelle eines Aufbaus mit und ohne Peltiermodul miteinander verglichen. Die Gegenüberstellung erfolgt in Abhängigkeit der aufgewendeten elektrischen Leistung und des thermischen Widerstands der Wärmesenke. Eine angemessene Vergleichbarkeit soll durch gleiche thermische Widerstände der verwendeten Wärmesenken gewährleistet werden. Die prinzipielle Anordnung des Referenz- und des Peltieraufbaus sind in Abbildung 4.27 dargestellt.



**Abbildung 4.27:** Schematischer Aufbau des Kühlsystems der roten LED mit und ohne Peltiermodul.

#### 4.3.3.2 BERECHNUNGSMODELL

Die Berechnung erfolgt auf der Basis von thermischen Zusammenhängen, die sich durch die entsprechenden thermischen Ersatzschaltbilder darstellen lassen. Die thermischen Ersatzschaltbilder des Referenz-

und des Peltieraufbaus sind in Abbildung 4.28 und Abbildung 4.29 aufgezeigt. Die thermischen Übergangswiderstände werden hierbei vernachlässigt.

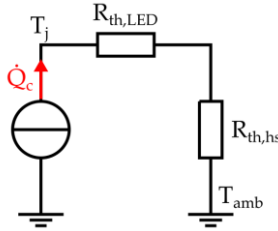


Abbildung 4.28: Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild des Referenzaufbaus.

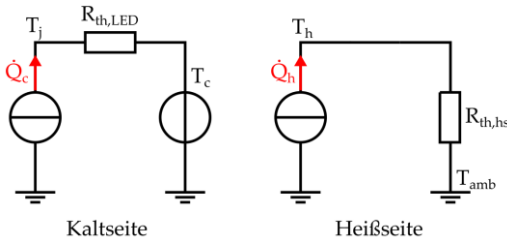


Abbildung 4.29: Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild des Aufbaus mit Peltiermodul.

Das Referenzmodell kann formal wie folgt ausgedrückt werden:

$$T_j = \overline{\dot{Q}_c} (R_{th,LED} + R_{th,hs}) + T_{amb} \quad (4.6)$$

$\overline{\dot{Q}_c}$  beschreibt dabei den mittleren Wrestrom, der durch die LED induziert wird,  $R_{th,LED}$  den Wrowiderstand der LED,  $R_{th,hs}$  den effektiven Wrowiderstand der Wresenke und  $T_{amb}$  die Umgebungstemperatur. Der mittlere Wrestrom entspricht der mittleren



elektrischen Leistung der LED  $P_{el,LED}$  abzüglich der abgegebenen Strahlungsleistung  $\Phi$ :

$$\overline{Q_c} = P_{el,LED} - \Phi = U_f I_f d - \Phi_e \quad (4.7)$$

Für das Modell wird der zeitliche Temperaturverlauf vernachlässigt und die mittlere elektrische Leistung der LED berechnet sich durch das Produkt der Durchlassspannung  $U_f$ , der Stromstärke  $I_f$  und des Tastverhältnisses  $d$ . Das Temperaturverhalten der LED bei einer definierten Stromstärke kann durch die Abhängigkeiten der Durchlassspannung, des emittierten Strahlungsflusses und des Lichtstroms  $\Phi_v$  modelliert werden:

$$U_f \rightarrow U_f(T_j); \Phi \rightarrow \Phi(T_j); \Phi_v \rightarrow \Phi_v(T_j) \quad (4.8)$$

Im Rahmen dieser Untersuchung werden diese Funktionen mithilfe von vorab durchgeführten Messungen an einer roten Höchstleistungs-LED mit einer Emissionsfläche von 3,9 mm<sup>2</sup> (OSRAM OSTAR LE A P1W) bestimmt. Die elektrischen, optischen und thermischen Charakteristika dieser LED und die entsprechenden Betriebsbedingungen sind in Tabelle 4.10 aufgeführt.

Anhand der Messdaten bei verschiedenen Temperaturen können die temperaturabhängigen Funktionen linear approximiert werden:

$$f(T_j) = a_1 T_j + a_0 \quad (4.9)$$

Die ermittelten Koeffizienten der drei Funktionen sind für eine Stromstärke von 12 A, einem Tastverhältnis von 50 % bei einer Frequenz von 1000 Hz in Tabelle 4.11 aufgeführt. Damit kann das Referenzmodell hinreichend abgebildet werden.

**Tabelle 4.10:** Gemessene Charakteristika einer roten AlInGaP-LED, die die Basis des LED-Modells dargestellt.

<b>LE A P1W</b>	
Leuchtfäche	3,9 mm <sup>2</sup>
Stromstärke	12 A
Durchlassspannung	2,99 V
Frequenz	1000 Hz
Tastgrad	0,5
Kühlkörpertemperatur	40 °C
Spitzenwellenlänge	635 nm
Dominante Wellenlänge	622 nm
Spitzenlichtstrom	1010 lm
Spitzenstrahlungsleistung	5,47 W
Thermischer Widerstand	0,9 K/W

---

**Tabelle 4.11:** Koeffizienten der Übertragungsfunktionen der Modell-LED.

<b>Ausgangsfunktion <math>y(x)</math></b>	<b>a<sub>1</sub></b>	<b>a<sub>0</sub></b>
Lichtstrom $\Phi_v(T_j [^{\circ}\text{C}])$ [lm]	$1,262 \cdot 10^{-3}$	3,056
Strahlungsleistung $\Phi_e(T_j [^{\circ}\text{C}])$ [W]	-4,923	$7,600 \cdot 10^2$
Durchlassspannung $U_f(T_j [^{\circ}\text{C}])$ [V]	$-1,799 \cdot 10^{-2}$	3,697

---

Die Modelle der Kalt- und der Heißseite des Peltiermoduls lassen sich analog aufstellen. Die Verbindung zwischen den beiden Seiten wird im Folgenden durch den Leistungskoeffizienten des Peltiermoduls (engl. coefficient of performance, abgekürzt COP) hergestellt. Dieser beschreibt den Quotienten des auf der Kaltseite erzeugten

Wärmestroms  $\overline{Q_c}$  und der eingepprägten elektrischen Leistung in das Modul  $P_{el,TEC}$ :

$$COP = \frac{\overline{Q_c}}{P_{el,TEC}} \quad (4.10)$$

Anhand des optimalen COP, also des Leistungsfaktors im idealen Arbeitspunkt bei den gegebenen Randbedingungen, kann das bestmögliche Verhalten eines Peltiermoduls abgebildet werden. Der optimale COP kann durch folgende Formel ausgedrückt werden [58]:

$$COP_{opt} = \frac{T_{ave}}{\Delta T} \frac{\sqrt{1 + Z(T_{ave}) T_{ave}} - 1}{\sqrt{(1 + Z(T_{ave}) T_{ave}) + 1}} - 0.5 \quad (4.11)$$

$T_{ave}$  beschreibt hier den Mittelwert der absoluten Temperatur der Kalt- und der HeiÙseite in Kelvin,  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Moduls, und  $Z(T_{ave})$  einen temperaturabhängigen Materialparameter. Die geometrischen MaÙe des Moduls werden dabei nicht berücksichtigt. Nach der Vorgabe der erforderlichen Parameter kann das Gleichungssystem gelöst werden. Die benötigten Berechnungsschritte für die Bestimmung der relevanten GroÙen sind im Anhang A.2 ausgeführt.

### 4.3.3.3 ERGEBNISSE

Die Berechnungen werden entsprechend der in Tabelle 4.12 angegebenen Parameter durchgeführt. Die Kaltseitentemperatur wird dahingehend angepasst, dass sich für den COP sinnvolle Werte zwischen 0,1 und 5 ergeben.

Tabelle 4.12: Randbedingungen für die Berechnung der Modelle.

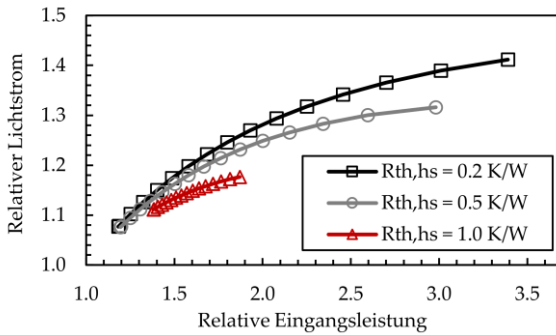
Parameter	Wert
Umgebungstemperatur $T_{amb}$	35 °C
Thermischer Widerstand der LED inkl. Wärmeleitmaterial $R_{th,LED}$	1,0 K/W
Thermischer Widerstand der Wärmesenke auf der Heiseite inkl. Wärmeleitmaterial $R_{th,hs}$	0,2...1,0 K/W

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 4.30 grafisch dargestellt. Hier ist der relative Lichtstrom gegenüber der relativen Eingangsleistung aufgetragen. Die Werte berechnen sich aus dem Quotienten der entsprechenden Größe des Peltiermodells und des Referenzmodells:

$$\Phi_{v,rel} = \frac{\Phi_{v,TEC}}{\Phi_{v,Referenz}} \quad (4.12)$$

$$P_{el,rel} = \frac{P_{el,LED,TEC} + P_{el,TEC}}{P_{el,LED,Referenz}} \quad (4.13)$$

Lichtstrom nimmt mit zunehmender Eingangsleistung zu. Die stärkste Zunahme ist beim niedrigsten thermischen Widerstand der Wärmesenke auf der Heiseite zu beobachten. Je größer der thermische Widerstand auf der Heiseite ist, desto geringer ist die Steigung des relativen Lichtstroms.



**Abbildung 4.30:** Verlauf des relativen Lichtstroms der LED über die relative Eingangsleistung des Systems bei verschiedenen effektiven thermischen Widerständen der Wärmesenke auf der Heiseite.

Bei der 3,4-fachen Eingangsleistung gegenüber der Referenz kann eine maximale Erhöhung des Lichtstroms um einen Faktor von 1,41 beobachtet werden. Bei der doppelten Eingangsleistung beträgt der Faktor 1,28. Wird der thermische Widerstand auf 0,5 K/W erhöht, liegt der Faktor der maximalen Lichtstromerhhung bei 1,31 bei einer verdreifachten Eingangsleistung. Bei einer Verdopplung der Eingangsleistung beträgt der Wert 1,25. Bei einer weiteren Erhöhung des thermischen Widerstands auf 1,0 K/W liegt der Maximalwert bei noch 1,18 bei der Erhöhung der Eingangsleistung um einen Faktor von 1,87.

#### 4.3.3.4 FAZIT

In diesem Abschnitt wurden anhand theoretischer Betrachtungen die Auswirkungen der Verwendung eines Peltiermoduls im Kühlsystem der roten LED mit einer Emissionsfläche von  $3,9 \text{ mm}^2$  untersucht. Hierbei wurden die Lichtströme eines Referenzmodells ohne Peltiermodul und eines Versuchsmodells mit Peltiermodul miteinander verglichen. Es wurden identische Wärmesenken zum Abführen der Wärme angenommen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass der Lichtstrom der roten LED durch den Einsatz eines Peltiermoduls grundsätzlich erhöht werden kann. Dieser hängt vorwiegend vom thermischen Widerstand auf der Heiseite des Moduls ab. Je niedriger der wirksame thermische Widerstand ist, desto niedrigere Temperaturen können auf der Kaltseite, auf der sich die LED befindet, erreicht werden. Es wurde ein maximaler Verstärkungsfaktor von 1,41 beobachtet. Dieser ist jedoch mit einer Erhöhung der elektrischen Eingangsleistung um den Faktor 3,4 verbunden. Da die Systemeffizienz dadurch drastisch verringert wird, wird dieser Arbeitspunkt für die Anwendung ausgeschlossen.

Ein besserer Kompromiss aus aufgewendeter elektrischer Leistung und Lichtstromgewinn ergibt sich bei niedrigeren Leistungswerten, bei denen die Kurve noch stärker ansteigt, bevor sie sich einem Grenzwert annähert. Beispielsweise ergibt sich bei einer 1,5-fachen Eingangsleistung gegenüber der Referenz maximal eine Lichtstromerhhung um etwa 18 %. Dieser Wert kann bei maximalem COP erreicht werden. Es ist folglich davon auszugehen, dass in einer praktischen Umsetzung niedrigere Werte erreicht werden. Außerdem ist zu beachten, dass der Wert des thermischen Widerstands von  $0,2 \text{ K/W}$  optimistisch gewählt

wurde und in einem bauraumbegrenzten System nur mit großem Aufwand zu realisieren ist. Daher ist davon auszugehen, dass eine Anwendung bei größeren LEDs, die bei der gleichen Stromdichte betrieben, eine noch größere Herausforderung darstellt, da hierfür nochmals eine entsprechende verbesserte Kühlung erforderlich wäre.

In Anbetracht der niedrigen möglichen Zugewinne im Lichtstrom gegenüber der erheblichen kostenintensiven Aufwände (Peltiermodul, elektrischer Treiber, verbesserte Wärmesenke), muss die Schlussfolgerung getroffen werden, dass dieser Ansatz lediglich ein sehr geringes Anwendungspotential besitzt. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt ein andersartiger Ansatz untersucht, um die Leuchtdichte der roten LED zu erhöhen.

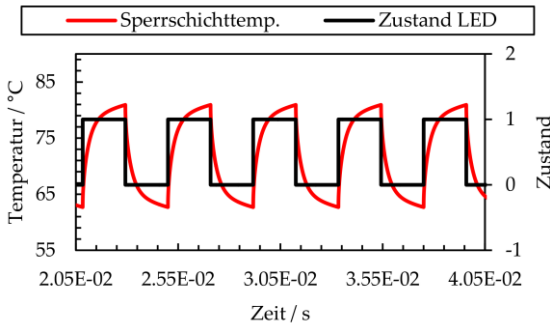
#### **4.3.4 ERHÖHUNG DER PULSFREQUENZ**

In DLP-Projektoren werden die LEDs sequentiell mit bestimmten Tastverhältnissen angesteuert, um einen speziellen Weißfarbort zu erreichen. Die Frequenz kann hierbei theoretisch beliebig gewählt werden. Die Obergrenze wird vorwiegend durch die Umschaltzeit der Mikrospiegel bestimmt, welche bei etwa  $2,5 \mu\text{s}$  liegt [12]. Berücksichtigt man außerdem die internen Signallaufzeiten und die Forderung nach getrennten Darstellungen der drei Farben, sind Frequenzen im niedrigen Kilohertzbereich ohne Weiteres möglich.

Die Auswirkung der Pulsfrequenz auf die emittierte Strahlung der roten LED wird im folgenden Teil näher beleuchtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden 2017 in [59] veröffentlicht.

## 4.3.4.1 KONZEPT

Während des Pulsbetriebs der LED mit einer bestimmten Frequenz und einem definierten Tastverhältnis, verändert sich deren Sperrschichttemperatur kontinuierlich. Dies ist auch im eingeschwungenen Zustand der Fall. Die Temperaturen steigen während des Ein-Zustands an und sinken während des Aus-Zustands ab. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft bei einer Frequenz von 240 Hz und einem Tastgrad von 50 % in der folgenden Abbildung 4.31 dargestellt.

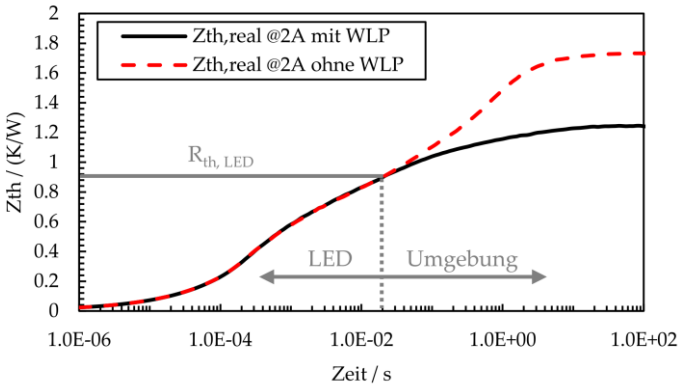


**Abbildung 4.31:** Veränderung der Temperatur der Sperrschicht, während des Pulsbetriebs bei einer Frequenz von 240 Hz und einem Tastverhältnis von 0,5.

Die Form des Verlaufs wird insbesondere durch die thermische Impedanz  $Z_{th}$  und den thermischen Widerstand  $R_{th}$  bestimmt. Diese beiden Größen ergeben sich aus den thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten der verwendeten Chip- und Gehäusematerialien. Die thermische Impedanz kann durch eine sogenannte  $Z_{th}$ -Kurve visualisiert werden, die den Anstieg der Temperatur pro eingepprägter elektrischer Leistung (elektrische thermische Impe-



danz  $Z_{th,el}$ ) bzw. pro eingepprägtem Wärmestrom (reale thermische Impedanz  $Z_{th,real}$ ) über die Zeit darstellt. Zwei gemessene Kurven der realen thermischen Impedanz einer roten AlInGaP-LED von OSRAM OS (LE A P1W) mit einer Emissionsfläche von  $3,9 \text{ mm}^2$  sind in Abbildung 4.32 gezeigt.



**Abbildung 4.32:** Gemessene  $Z_{th,real}$ -Kurven einer roten AlInGaP-LED für Projektionsanwendungen (OSRAM OS, LE A P1W) mit und ohne Wärmeleitpaste (Arctic MX-4).

Eine schwarze Kurve wurde mit, die gestrichelte rote ohne Wärmeleitpaste zwischen der Kühlplatte und der LED-Rückseite aufgenommen. Der Aufspreitzpunkt der beiden Kurven gibt den thermischen Widerstand der gesamten LED an (hier  $0,9 \text{ K/W}$ ). Der Kurvenverlauf links des Aufspreitzpunkts ist der LED zugehörig, der Verlauf rechts davon der Umgebung.

Für die Untersuchung des emittierten Lichtstroms ist lediglich der Temperaturverlauf während des eingeschalteten Zustands der LED von Bedeutung. Eine Abschätzung der Temperatur der Sperrschicht

am Ende eines Pulses  $T_{j, eop}$  während des kontinuierlichen Pulsbetriebs kann anhand folgender Formel erfolgen [60]:

$$T_{j, eop} = T_{hs} + dR_{th}\dot{Q} + (1 - d)Z_{th}(t_p)\dot{Q} \quad (4.14)$$

Hierbei repräsentiert  $T_{hs}$  die Kühlkörpertemperatur,  $d$  das Tastverhältnis,  $R_{th}$  den thermischen Widerstand des Bauteils,  $\dot{Q}$  den im Bauteil erzeugten Wärmestrom, und  $Z_{th}(t_p)$  den Wert der thermischen Impedanz bei einer Pulslänge von  $t_p$ , die vom Tastgrad und der Pulsfrequenz  $f$  abhängt:

$$t_p = d \cdot \frac{1}{f} \quad (4.15)$$

Aus den Formeln (4.14) und (4.15) ist abzuleiten, dass sich die Temperatur am Ende des Pulses mit der Variation der Pulslänge bei konstantem Tastgrad und folglich mit der Frequenz verändert. Betrachtet man den Grenzfall für eine Frequenz gegen Null ( $t_p$  gegen unendlich), erhält man die maximale durchschnittliche Sperrschichttemperatur während des An-Zustands der LED:

$$T_{j, av, max} = T_{hs} + R_{th}\dot{Q} \quad (4.16)$$

Der zweite Grenzwert für eine Pulsfrequenz gegen unendlich ( $t_p$  gegen Null) zeigt die minimale mittlere Sperrschichttemperatur auf, welche dann folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$T_{j, av, min} = T_{hs} + dR_{th}\dot{Q} \quad (4.17)$$

Da sich die Ergebnisse unterscheiden und ein stetiger Übergang zwischen den beiden Grenzwerten anzunehmen ist, ist davon auszugehen, dass die mittlere Temperatur der Sperrschicht mit steigender Frequenz abnimmt. Aufgrund der starken Temperatur-

---

abhängigkeit des Lichtstroms der AlInGaP-LED und den hohen auftretenden Wärmeströmen ist zu vermuten, dass somit auch der mittlere Spitzenlichtstrom mit steigenden Frequenzen zunimmt.

Die Quantifizierung und der Nachweis dieses Zusammenhangs ist die zentrale Zielsetzung dieser Untersuchung. Als Versuchsobjekte werden rote AlInGaP-LEDs des Typs LE A P1W verwendet. In diesem Rahmen wird zunächst ein passendes Simulationsmodell erstellt, das auf der Analogie elektrischer und thermischer Größen basiert. Anschließend werden reale Bauteile bei verschiedenen Frequenzen und Tastgraden messtechnisch charakterisiert, um den Einfluss der Frequenz nachzuweisen.

#### 4.3.4.2 SIMULATIONSMODELL

Das Simulationsmodell basiert auf der Analogie von elektrischen und thermischen Größen. In der Simulation werden elektrische Widerstände und Kapazitäten verwendet, um thermische Widerstände und Kapazitäten zu modellieren. Wärmeströme werden durch elektrische Ströme beschrieben, Temperaturdifferenzen durch elektrische Spannungsdifferenzen. Der  $Z_{th}$  kann durch ein sogenanntes Foster-Netzwerk beschrieben werden. In dieser Untersuchung wird dieses Modell gegenüber dem Cauer-Netzwerk vorgezogen, weil systematische Fehler leichter erkannt werden können und die Möglichkeit der analytischen Berechnung besteht [61].

Das thermische Modell wird in LTspice umgesetzt, wie in Abbildung 4.33 dargestellt.

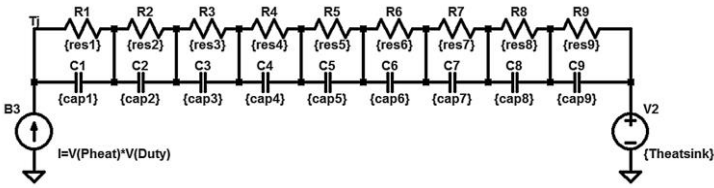


Abbildung 4.33: Thermisches Simulationsmodell der AlInGaP-LED in LTspice.

Die thermische Impedanz der LED ist im Modell durch eine 9-stufige Anordnung von RC-Gliedern (R1...R9, C1...C9) wiedergegeben. Die Stromquelle B3 repräsentiert die Wärmequelle innerhalb der Sperrschicht, deren Wärmestrom von dort aus ins Netzwerk fließt. Die Wärmesenke konstanter Temperatur wird durch die Spannungsquelle V2 modelliert. Für dieses Modell wird angenommen, dass die Werte der thermischen Widerstände und Kapazitäten konstant sind und sich auch bei höheren Temperaturen nicht verändern.

Die Werte der Widerstände und Kapazitäten des Modells werden anhand der gemessenen  $Z_{th}$ -Kurve bestimmt, die in Abbildung 4.32 gezeigt wurde. Hierbei wird die Kurve verwendet, bei deren Messung Wärmeleitpaste benutzt wurde. Die Messkurve kann mithilfe des folgenden Gleichungssystems angenähert werden [61]:

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}} \right) \quad (4.18)$$

Die ermittelten Werte der RC-Glieder sind in Tabelle 4.13 aufgelistet.

**Tabelle 4.13:** Werte der thermischen Widerstände und Kapazitäten des Simulationsmodells.

	<b>R / (K/W)</b>	<b>C (W·s/K)</b>
1	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
2	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
3	$6,84 \cdot 10^{-2}$	$5,62 \cdot 10^{-4}$
4	$3,97 \cdot 10^{-1}$	$7,67 \cdot 10^{-4}$
5	$2,54 \cdot 10^{-1}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$
6	$2,40 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$
7	$1,32 \cdot 10^{-1}$	2,23
8	$8,80 \cdot 10^{-2}$	$3,80 \cdot 10^1$
9	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^3$

Die Übertragungsfunktionen, die für die Bestimmung der thermischen und optischen Ausgangswerte aus den Eingangsparametern benötigt werden, werden aus typischen Kurven des verwendeten LED-Typs extrahiert [40]. Die Kurven werden durch lineare oder quadratische Polynomfunktionen entsprechend folgender Form angenähert:

$$y(x) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (4.19)$$

Die ermittelten Koeffizienten der Funktionen sind in Tabelle 4.14 angegeben.

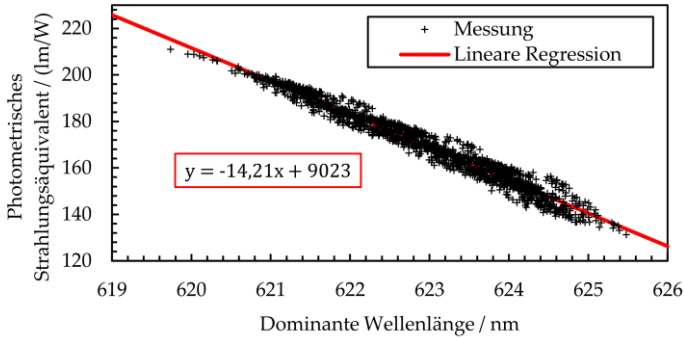
**Tabelle 4.14:** Koeffizienten der elektrischen, thermischen und optischen Übertragungsfunktionen.

Ausgangsfunktion $y(x)$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
Durchlassspannung $U_f(I_f[A])[V]$		$1,06 \cdot 10^{-1}$	2,09
Spannungsdifferenz $dU_f(T_j[K])[V]$	$7,61 \cdot 10^{-6}$	$-6,71 \cdot 10^{-3}$	1,32
Differenz der dominanten Wellenlänge $d\lambda_{dom}(T_j[K])[nm]$		$7,12 \cdot 10^{-2}$	$-2,11 \cdot 10^1$
Relativer Lichtstrom $\Phi_{v,rel}(T_j[K])$	$9,27 \cdot 10^{-6}$	$-1,39 \cdot 10^{-2}$	4,32
Relativer Lichtstrom $\Phi_{v,rel}(I_f[A])$	$-2,38 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$	$-8,35 \cdot 10^{-2}$

Der Strahlungsfluss, der für die Ermittlung des erzeugten Wärme-  
stroms zwingend erforderlich ist, kann nicht direkt ermittelt werden.  
Deshalb wird dieser aus dem Quotienten des Lichtstroms und dem  
dazugehörigen photometrischen Strahlungsäquivalent  $K$  ermittelt:

$$\Phi = \frac{\Phi_v}{K} \quad (4.20)$$

Messungen an mehreren Bauteilen des LED-Typs zeigen einen  
näherungsweise linearen Verlauf des photometrischen Strahlungs-  
äquivalents in Abhängigkeit der dominanten Wellenlänge. Die  
Messdaten der Strahlungsäquivalente in Abhängigkeit der dominanten  
Wellenlänge und eine angepasste lineare Regressionskurve sind in der  
folgenden Abbildung 4.34 dargestellt.



**Abbildung 4.34:** Gemessene photometrisches Strahlungsäquivalente von zehn LEDs des Typs LE A PIW betrieben bei verschiedenen Frequenzen, Stromstärken, Temperaturen und Tastgraden (1350 Datenpunkte).

Sämtliche erforderliche Funktionen werden in LTspice mithilfe von steuerbaren Spannungsquellen realisiert. Die Stromquelle B3, die den von der Sperrschicht ausgehenden Wärmestrom repräsentiert, wird durch eine Spannungsquelle gesteuert, die ein Signal mit der vorgegebenen Kombination aus Frequenz und Tastgrad bereitstellt. Die Form der Pulse wird als näherungsweise ideal modelliert. Die Anstiegs- und Abfallzeiten werden auf einen Wert von einer Nanosekunde gesetzt.

Um die Eingangsparameter zu ermitteln, werden die elektro-optischen Eigenschaften von zehn LEDs der entsprechenden Bauart bei definierten Bedingungen gemessen und gemittelt. Die Mittelwerte der gemessenen Größen können Tabelle 4.15 entnommen werden.

Das Simulationsmodell wird auf diese Werte kalibriert. Die Simulation wird bei anwendungsnahen Randbedingungen durchgeführt. Daher werden Kühlkörpertemperaturen von bis zu 80 °C betrachtet. Bei den vorliegenden LEDs werden Puls-Stromstärken bis hin zu 16 A

untersucht, bei Tastverhältnissen bis zu 50 %. Die Werte der Frequenzen werden durch Vielfache der sehr verbreiteten Bildrate von 60 Hz gebildet. Als Referenz für die relativen Untersuchungen werden die Werte bei 240 Hz verwendet. Der verwendete Parametersatz ist in Tabelle 4.16 dargestellt.

**Tabelle 4.15:** Gemittelte Werte der gemessenen roten AllnGaP-LEDs.

	<b>LE A P1W</b>
Stromstärke	12 A
Durchlassspannung	3,01 V
Frequenz	1000 Hz
Tastverhältnis	0,25
Kühlkörpertemperatur	25 °C
Spitzenwellenlänge	630,6 nm
Dominante Wellenlänge	620,2 nm
Spitzenlichtstrom	1300 lm
Spitzenstrahlungsleistung	6,30 W

**Tabelle 4.16:** Parameter der durchgeführten Untersuchungen.

<b>Parameter</b>	<b>Werte</b>
Kühlkörpertemperatur $T_{hs}$	40 °C / 60 °C / 80 °C
Stromstärke $I_f$	8 A / 12 A / 16 A
Tastverhältnis $d$	30 % / 40 % / 50 %
Frequenz $f$	240 Hz / 480 Hz / 960 Hz / 1440 Hz / 1920 Hz



Für jede Parameterkombination wird eine Simulation durchgeführt, die eine 5-sekündige Belastungsphase vorsieht. Die entsprechenden Ergebnisse werden während der letzten 100 Strompulse ermittelt. Hierdurch wird sichergestellt, dass sich das System in einem eingeschwungenen Zustand befindet und die Belastungsdauer unabhängig von der Frequenz ist. Weiterhin sind diese Messbedingungen so gewählt, dass sie gegebenenfalls experimentell nachgebildet werden können.

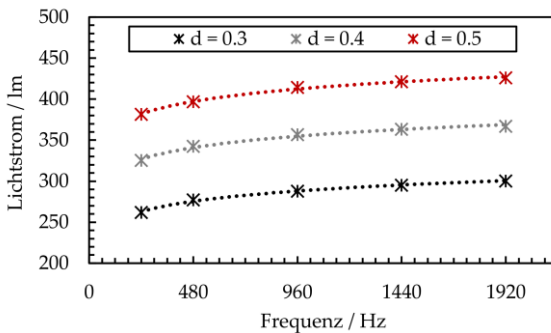
#### 4.3.4.3 SIMULATIONSERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Simulation sind folgend anhand der Werte bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einem Strom von 16 A dargestellt. Diese Werte sind repräsentativ für sämtliche Parameterkombinationen, weshalb für andere Temperaturen und niedrigere Stromstärken lediglich die Unterschiede dargelegt werden.

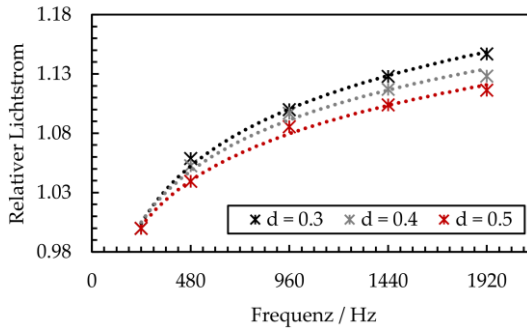
Die folgenden beiden Graphen zeigen die beschriebenen Ergebnisse der Simulationen für den absoluten Lichtstrom (Abbildung 4.35) sowie die relative Zunahme des Lichtstroms (Abbildung 4.36).

Aus den Graphen geht deutlich hervor, dass der emittierte Lichtstrom mit steigenden Frequenzen zunimmt. Bei einem Tastverhältnis von 40 % steigt der Lichtstrom von 325 lm bei einer Frequenz von 240 Hz auf 357 lm bei 960 Hz an und erreicht bei 1920 Hz einen Wert 367 lm. Relativ betrachtet ist gegenüber dem Wert bei 240 Hz eine Zunahme des Lichtstroms um 10 % bei 960 Hz und 13 % bei 1920 Hz festzustellen. Der Darstellung in Abbildung 4.36 ist außerdem zu entnehmen, dass die relative Zunahme des Lichtstroms vom Tastgrad abhängt. Je

geringer dieser ist, desto höher fällt der Zugewinn aus. Auch die Kühlkörpertemperatur wirkt sich auf den Zugewinn im Lichtstrom aus. Je höher die Temperatur ist, desto geringer sind zwar die absoluten Werte, desto höher ist aber auch die Lichtstromzunahme bei höheren Frequenzen. Die höchste relative Zunahme wurde bei einer Kühlkörpertemperatur von 80 °C, einem Tastverhältnis von 30 % und einer Stromstärke von 16 A beobachtet. In diesem Arbeitspunkt konnte ein relativer Zugewinn von 19 % festgestellt werden. Die geringste Lichtstromerhöhung wurde bei der niedrigsten untersuchten Stromstärke von 8 A, der geringsten Kühlkörpertemperatur von 40 °C und dem höchsten Tastgrad von 50 % ausgemacht. Hier wurde lediglich eine Zunahme von rund 3 % erreicht.



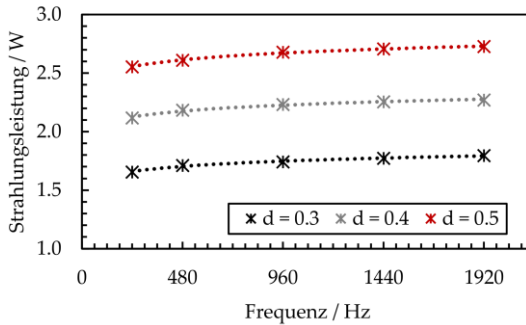
**Abbildung 4.35:** Simulierter Lichtstrom als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A.



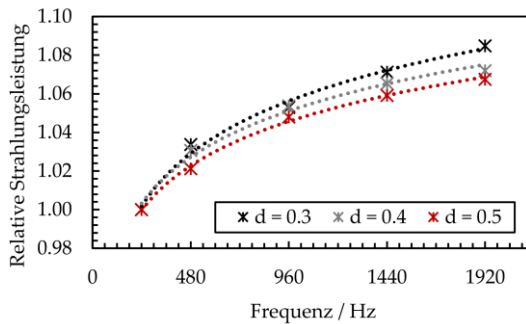
**Abbildung 4.36:** Simulierter relativer Lichtstrom als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A, normiert auf den Wert bei 240 Hz.

Der Strahlungsfluss verhält sich sehr ähnlich zum Lichtstrom. Die Werte nehmen zu von 2,12 W bei 240 Hz auf 2,23 W bei 960 Hz, bis auf einen Wert von 2,27 W bei 1920 Hz bei einem Tastverhältnis von 40 %. Der relative Anstieg ist hierbei mit Werten von 5 % bei 960 Hz und 7 % bei 1920 Hz deutlich geringer. Nichtsdestotrotz sind die Einflüsse des Tastgrads und der Kühlkörpertemperatur des Lichtstroms auf die Strahlungsleistung übertragbar. Die entsprechenden Graphen, der absoluten und relativen Werte sind in Abbildung 4.37 und Abbildung 4.38 gezeigt.

Die Ergebnisse der Simulation sind mit Zugewinnen im Lichtstrom von bis zu 19 % sehr vielversprechend. Aus diesem Grund sollen die Ergebnisse anhand von experimentellen Daten bestätigt werden.



**Abbildung 4.37:** Simulierte Strahlungsleistung als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A.



**Abbildung 4.38:** Simulierte relative Strahlungsleistung als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A, normiert auf den Wert bei 240 Hz.

#### 4.3.4.4 EXPERIMENTELLER AUFBAU

Für die Validierung der Ergebnisse werden zehn Bauteile gemessen. Die Messbedingungen werden analog zu den Simulationsbedingungen gewählt (siehe hierzu Tabelle 4.16). Folglich werden pro LED 135

Messungen durchgeführt. Um die Messparameter hinreichend umsetzen zu können, wird ein passender Messaufbau benötigt.

Der verwendete Messaufbau [51] besitzt zwei parallel geschaltete Keithley SourceMeter 2651A, die den Strom in der erforderlichen Qualität bereitstellen und zudem über eine Vielleitermessung die Durchlassspannung des Bauteils bestimmen. Der Kühlkörper besteht im Wesentlichen aus einer massiven Kupferplatte mit einer sehr hohen thermischen Kapazität, um eine stabile Temperatur zu gewährleisten. Die Temperierung dieser Platte übernehmen ein Hochleistungspeltiermodul, Thermoelemente und eine entsprechende Treibereinheit. Die optischen Messungen werden mithilfe einer 500 mm-Ulbrichtkugel und einem fasergekoppelten Spektrometer der Firma Instrument Systems durchgeführt.

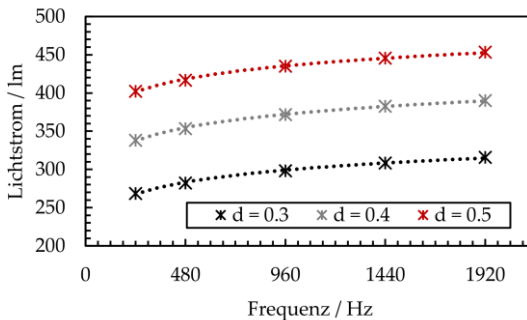
Jeder einzelne Messvorgang läuft folgendermaßen ab: Die Kühlplatte wird auf Zieltemperatur gebracht. Nachdem sich die Temperatur stabilisiert hat, wird die LED für fünf Sekunden mit den entsprechenden Strompulsen belastet. Die Messungen erfolgen dann während der letzten 100 Pulse.

Die Darstellung der Messergebnisse erfolgt im folgenden Abschnitt anhand der Mittelwerte der zehn Bauteile und analog zu den präsentierten Simulationsergebnissen.

#### **4.3.4.5 MESSERGEBNISSE**

Die Messergebnisse zeigen, ähnlich zu den Simulationsergebnissen, deutliche Anstiege der Lichtströme bei steigenden Pulsfrequenzen bei

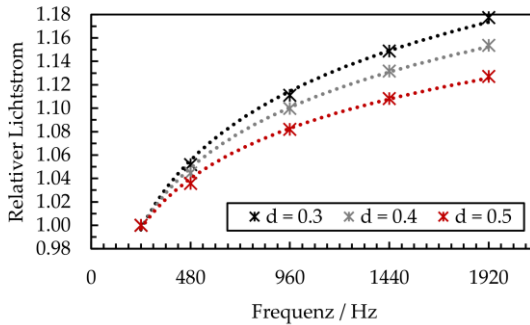
konstantem Tastgrad. Die Ergebnisse werden folgend anhand der Daten bei einer Stromstärke von 16 A und einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C aufgezeigt. Die absoluten Zahlen des Lichtstroms bei verschiedenen Tastverhältnissen sind in Abhängigkeit der Pulsfrequenz in Abbildung 4.39 dargestellt. Die dazugehörigen relativen Werte sind in Abbildung 4.40 gezeigt.



**Abbildung 4.39:** Gemessener Lichtstrom als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A.

Der Lichtstrom beträgt bei 240 Hz und einem Tastverhältnis von 40 % 338 lm. Bei 960 Hz erreicht der Wert 372 lm und bei 1920 Hz 390 lm. Relativ betrachtet, entsprechen diese Werte Zugewinnen von 10 % und 15 % gegenüber dem Wert bei 240 Hz.

Der relativen Darstellung aus Abbildung 4.40 ist ebenfalls zu entnehmen, dass das Tastverhältnis einen Einfluss auf die relativen Werte hat. Bei dem höheren Tastgrad von 50 % beträgt die Zunahme 13 %, während bei einem Tastverhältnis von 30 % ein Wert von 18 % erreicht wird (1920 Hz gegenüber 240 Hz).



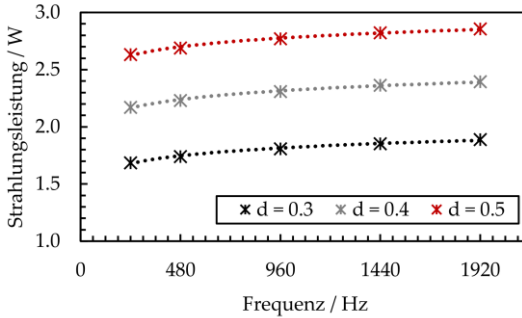
**Abbildung 4.40:** Gemessener relativer Lichtstrom als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A, normiert auf den Wert bei 240 Hz.

Bei niedrigeren Stromstärken reduzieren sich sowohl die absoluten Lichtströme, als auch die relativen Zugewinne. Bei 8 A und einem Tastgrad von 30 % liegt die Zunahme bei 1920 Hz gegenüber 240 Hz bei 6 %. Bei 12 A liegt der Wert bei 11 %. Auch die Kühlkörpertemperatur wirkt sich auf die Messergebnisse aus. Bei höheren Kühlkörpertemperaturen werden höhere Zugewinne erreicht. Beispielsweise beträgt der relative Anstieg 20 % bei einer Temperatur von 80 °C, einer Stromstärke von 16 A und einem Tastverhältnis von 30 %.

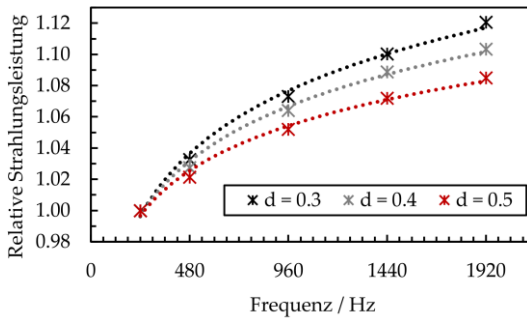
Zusätzlich wurden die Werte der Strahlungsleistung untersucht. Die entsprechenden Kurven der absoluten und relativen Werte sind in Abbildung 4.41 und Abbildung 4.42 skizziert.

Die Graphen zeigen in ihrer Form starke Ähnlichkeiten mit den korrespondierenden Graphen des Lichtstroms. Die absoluten Werte steigen bei einem Tastverhältnis von 40 % von 2,17 W bei 240 Hz über

2,31 W bei 960 Hz auf 2,39 W bei 1920 Hz an. Die relativen Werte liegen etwas niedriger als beim Lichtstrom und belaufen sich auf 7 % bei 960 Hz und 12 % bei 1920 Hz.



**Abbildung 4.41:** Gemessene Strahlungsleistung als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A.



**Abbildung 4.42:** Gemessene relative Strahlungsleistung als Funktion der Pulsfrequenz bei einer Kühlkörpertemperatur von 60 °C und einer Stromstärke von 16 A, normiert auf den Wert bei 240 Hz.

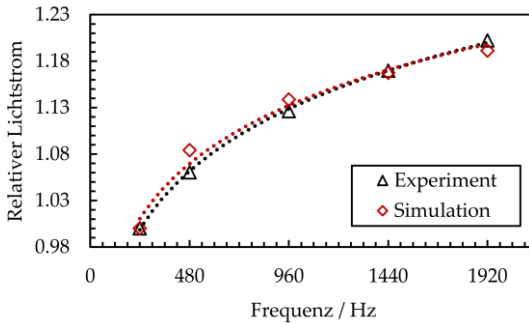


Die Auswirkungen der Stromstärke und der Kühlkörpertemperaturen entsprechen denen des Lichtstroms: Je höher die Kühlkörpertemperaturen und je niedriger die Tastgrade sind, desto höher ist die Zunahme der Strahlungsleistung. Folglich wird der höchste Zugewinn bei einer Temperatur von 80 °C, einer Stromstärke von 16 A und einem Tastverhältnis von 30 % beobachtet. Hier beläuft sich der Wert auf 14 %.

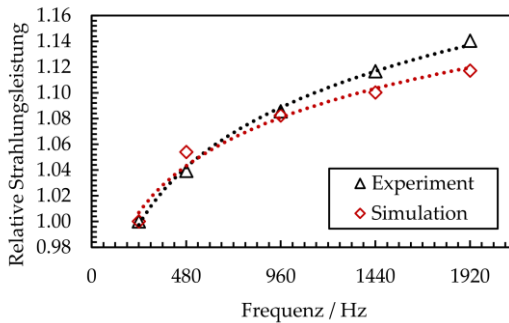
#### 4.3.4.6 DISKUSSION

Die Simulationen und die Messungen zeigen bei der Erhöhung der Pulsfrequenz eine deutliche Zunahme des Strahlungsflusses und des Lichtstroms von roten Höchstleistungs AlInGaP-LEDs. Hierbei wurde beobachtet, dass der relative Zugewinn vom Tastverhältnis, von der eingepprägten Stromstärke und von der Kühlkörpertemperatur beeinflusst wird. Experimentell konnten maximale Zugewinne von 20 % im Lichtstrom und 14 % im Strahlungsfluss bei der maximalen Stromstärke von 16 A, dem minimalen Tastverhältnis von 30 % und der höchsten Kühlkörpertemperatur von 80 °C ausgemacht werden, wenn die Frequenz von 240 Hz auf 1920 Hz erhöht wurde. Analog dazu zeigt die Simulation Werte von 19 % und 12 %.

Aufgrund der Abweichung der absoluten Werte werden für den Vergleich von Simulation und Experiment die relativen Werte herangezogen. Eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse des Lichtstroms und der Strahlungsleistung bei einer Stromstärke von 16 A, einer Kühlkörpertemperatur von 80 °C und einem Tastverhältnis von 30 % sind in Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44 gegeben.



**Abbildung 4.43:** Relativer Lichtstrom des Experiments und der Simulation bei einer Kühlkörpertemperatur von 80 °C, einer Stromstärke von 16 A und einem Tastverhältnis von 30 % bezogen auf den Wert bei 240 Hz.



**Abbildung 4.44:** Relative Strahlungsleistung des Experiments und der Simulation bei einer Kühlkörpertemperatur von 80 °C, einer Stromstärke von 16 A und einem Tastverhältnis von 30 % bezogen auf den Wert bei 240 Hz.

Hier ist zu erkennen, dass die relativen Kurven des Lichtstroms gut übereinstimmen. Die Kurven unterscheiden sich dennoch leicht in ihrer Form. Während die simulierten Werte bei niedrigeren Frequenzen etwas zu hoch angesiedelt sind, flacht die Kurve zu höheren Frequenzen stärker ab und zeigt etwas niedrigere Werte als das

Experiment. Diese Abweichungen sind im relativen Strahlungsfluss noch augenscheinlicher. Die Übereinstimmung ist deutlich geringer und die Kurven überschneiden sich bereits unterhalb einer Frequenz von 960 Hz.

Da zufällige Fehler aufgrund der individuellen Messung von zehn Bauteilen und sehr geringen Standardabweichungen weitgehend auszuschließen sind, sind die Unterschiede zwischen Simulation und Messungen vermutlich vorwiegend durch die begrenzte Genauigkeit der gemessenen  $Z_{th}$ -Kurve und das Umrechnungsverfahren von Lichtstrom in Strahlungsleistung begründet. Weitere Fehlermöglichkeiten bestehen aufgrund der limitierten Qualität der elektrischen, optischen und thermischen Übertragungsfunktionen. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Form der Strompulse im Experiment. Obwohl die Stromquelle Pulse sehr hoher Qualität liefert, ist die Stromsteilheit begrenzt, zum Beispiel aufgrund vorhandener parasitärer Induktivitäten der verwendeten Leitungen.

Nichtsdestotrotz können sowohl die Abhängigkeiten der Frequenz als auch die damit zusammenhängenden Einflüsse der Stromstärke, der Kühlkörpertemperatur und des Tastverhältnisses durch das Simulationsmodell abgebildet werden. Die zugrundeliegenden Effekte können hinreichend durch die Verwendung elektro-thermischer Analogien beschrieben und erklärt werden. Durch die Verwendung verbesserter Transferfunktionen und höherwertiger Eingangsparameter kann die Genauigkeit der Simulationsergebnisse voraussichtlich weiter erhöht werden.

#### 4.3.4.7 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

In dieser Untersuchung wurde der Einfluss der Frequenz auf den Lichtstrom und die Strahlungsleistung von roten Höchstleistungs-LEDs untersucht, die auf dem AlInGaP-Materialsystem basieren. Zu diesem Zweck wurde ein passendes Simulationsmodell auf Basis elektro-thermischer Analogien in LTspice aufgesetzt und zehn Bauteile der Firma OSRAM OS des Typs LE A P1W mithilfe einer passenden Messapparatur individuell elektro-optisch vermessen.

Die Simulationen und Messungen bestätigten, dass der Strahlungsfluss und der Lichtstrom der LEDs mit steigenden Pulsfrequenzen ansteigen. Es ließ sich außerdem feststellen, dass die Stärke des Effekts von den anderen Betriebsbedingungen abhängt. Dazu gehören die Kühlkörpertemperatur, die Stromstärke und das Tastverhältnis. Der maximale Zugewinn wurde bei der höchsten untersuchten Temperatur von 80 °C, der höchsten Stromstärke von 16 A und dem niedrigsten Tastverhältnis von 30 % ermittelt. Die Simulation zeigte hier eine Erhöhung um 19 % im Lichtstrom und um 12 % in der Strahlungsleistung beim Vergleich der entsprechenden Werte bei 240 Hz und bei 1920 Hz. Die experimentellen Messungen ergaben mit 20 % (Lichtstrom) und 14 % (Strahlungsleistung) sehr ähnliche Werte.

Aus den Beobachtungen lässt sich schließen, dass sich signifikante Verbesserungen mithilfe erhöhter Pulsfrequenzen nur bei LEDs herbeiführen lassen, deren emittierte Strahlung stark mit steigenden Temperaturen zurückgeht. Darüber hinaus sind hohe Stromdichten erforderlich, die hohe Wärmeströme zur Folge haben. Daher ist damit zu rechnen, dass eine erhöhte Pulsfrequenz bei InGaN-basierten LEDs zu keiner erheblichen Verbesserung des Lichtstroms führt.

Die Umsetzbarkeit der aufgezeigten Lösung hängt vom LED-Treiber und dem eingesetzten Mikrodisplay ab. Sind beide Komponenten in der Lage, eine höhere LED-Pulsfrequenz zuzulassen, kann die aufgezeigte Frequenzabhängigkeit der roten LED dazu verwendet werden, den Lichtstrom des roten Farbkanals des LED-Projektionssystem zu erhöhen.

## **4.4 AUSWIRKUNGEN AUF DAS GESAMTSYSTEM**

Für die Abschätzung der Einflüsse der erarbeiteten Konzepte auf das gesamte Projektionssystem wird der Lichtstrom am Ausgang der Beleuchtungseinheit mit dem Transmissionsgrad des Systems verrechnet. Für diese Betrachtungen wird eine Kombination eines 0,65"-DMDs (DLP650NE von Texas Instruments) und LEDs des Typs OSRAM OSTAR LE x P2X verwendet, da die Werte der Étendue der beiden Elemente relativ gut zusammenpassen.

Mithilfe der LED- und Filtermodelle aus Abschnitt 3.2 kann der Lichtstrom der entsprechenden Beleuchtungseinheit berechnet werden. Als Basis für die Modelle werden Messdaten von roten, grünen und blauen LEDs herangezogen. Diese Daten und die entsprechenden Betriebsbedingungen sind in Tabelle 4.17 aufgeführt.

**Tabelle 4.17:** Elektro-optische Eigenschaften und Betriebsbedingungen der drei LEDs, die für die Berechnung des Projektorlichtstroms verwendet werden.

	LE A P2W	LE CG P2A	LE B P2W
Kühlkörpertemperatur	40 °C	60 °C	60 °C
Stromstärke	24 A	32 A	32 A
Pulsfrequenz	240 Hz	1000 Hz	1000 Hz
Tastgrad	25 %	50 %	25 %
Spitzen-Lichtstrom	2230 lm	10200 lm	1260 lm
Dominante Wellenlänge	617,0 nm	555,5 nm	462,5 nm

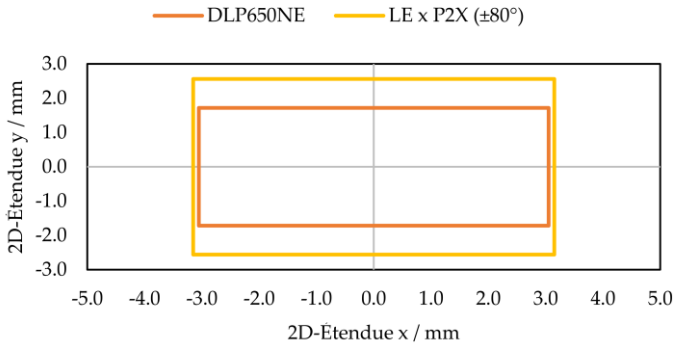
Für die eingesetzten LEDs werden Filter mit den Filterkanten bei 490 nm und 598 nm modelliert. Mit diesen kann eine volle Abdeckung des Rec.709-Farbraums erreicht werden. Aus diesen Daten können die Tastgrade der LEDs für das Erreichen des Zielweißpunkts und der resultierende Lichtstrom ermittelt werden. Für die hier angestellten Betrachtungen wird angenommen, dass der Spitzenlichtstrom unabhängig vom Tastverhältnis ist.

Für die Ermittlung der Transmission des Projektors werden zunächst die Verluste ermittelt, die aufgrund der geometrischen Fehlanpassung der LED und des DMDs auftreten. Zu diesem Zweck werden die 2D-Étendue-Werte der LEDs und des DMDs verglichen. Bei der Berechnung der 2D-Étendue-Werte der LEDs ist zu berücksichtigen, dass aufgrund geometrischer Limitierungen der Sammelwinkel nicht  $\pm 90^\circ$  betragen kann. Ein maximaler Sammelwinkel von  $\pm 80^\circ$  ist jedoch realisierbar. Die 2D-Étendue-Werte der LEDs berechnen sich mit dem Sammelwinkel  $\alpha$  also wie folgt:

$$\varepsilon_{2D,x} = 2 \sin(\alpha) x_{LED} \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_{2D,y} = 2 \sin(\alpha) y_{LED} \quad (4.22)$$

Dadurch reduzieren sich die beiden Werte jeweils um einen Faktor von 0,985. Gleichzeitig wird aber auch nicht der gesamte Strahlungsfluss der LEDs eingesammelt. Die Strahlungsleistung reduziert sich für einen näherungsweise Lambertschen Emittor um den Faktor  $\sin^2(80^\circ) = 0,97$ . Die 2D-Étendue-Werte des DMDs und der LEDs sind in Abbildung 4.45 veranschaulicht.



**Abbildung 4.45:** Diagramm der 2D-Étendues der gewählten Kombination aus DMD und LED.

Aus dem Diagramm ist zu extrahieren, dass die Étendue der gewählten LED deutlich größer ist als die Étendue des Mikrodisplays. Während die x-Werte nahezu übereinstimmen (DMD: 6,1 mm, LED: 6,3 mm), differieren die y-Werte deutlich (DMD: 3,4 mm, LED: 5,1 mm). Aufgrund dessen ergibt sich lediglich eine Übereinstimmung von 0,65.

Zuletzt werden die einzelnen Verlustmechanismen innerhalb des Strahlengangs eines LED-Projektors abgeschätzt. Zu diesem Zweck wird der Pfad der Strahlung verfolgt, nachdem sie die Beleuchtungseinheit verlassen hat. Für diese Betrachtungen werden für alle Primärfarben die gleichen optischen Effizienzen angenommen.

Die Strahlung der Beleuchtungseinheit muss zunächst durch eine Sammellinse in den Integrator eingekoppelt werden. Am Ausgang des Integrators werden die Strahlenbündel mithilfe von zwei weiteren Linsen geformt und durch ein Prisma auf den DMD abgelenkt. Die Strahlung wird von der aktiven Fläche des DMDs reflektiert, transmittiert erneut das Prisma und gelangt durch die Projektionsoptik hindurch auf einen Schirm. Die Effizienzen der einzelnen Komponenten sind in der folgenden Tabelle 4.18 zusammengefasst.

**Tabelle 4.18:** Effizienzen der Elemente einer typischen Projektionseinheit (ohne Beleuchtungseinheit) [9,21].

<b>Element</b>	<b>Effizienz</b>
Zwei Kollimationslinsen	0,94
Lichtstromsammlung ( $\pm 80^\circ$ )	0,97
Fehlanpassung Étendue	0,65
Integrator	0,85
Drei Linsen zur Strahlformung	0,91
TIR-Prisma	0,92
DMD	0,66
Überfüllfaktor (12 %)	0,89
Projektionsoptik	0,90
<b>Gesamt <math>\eta_{PE}</math></b>	<b>0,22</b>



Der Einfluss wird anhand von Verstärkungsfaktoren für die drei Farbkanäle umgesetzt. Für den roten Kanal wird eine Verstärkung um den Faktor 1,2 angenommen. Dieser Wert sollte aufgrund des deutlich höheren Wärmestroms des verwendeten Bauteils trotz der niedrigeren Kühlkörpertemperatur durch die Vervielfachung der Pulsfrequenz erreichbar sein.

Der grüne Farbkanal wird durch die zusätzliche Anregung des verwendeten Konverters verstärkt werden. Es ist zu erwarten, dass ein Faktor von mindestens 1,54 bei einem Sammelwinkel von  $\pm 80^\circ$  umsetzbar ist.

Der blaue Kanal kann durch das vorgestellte Light Recycling Konzept verstärkt werden. Da die Étendue der LED ohnehin deutlich zu groß ist, könnte das Konzept verwendet werden, um die Étendue der LED anzupassen und eine Steigerung der Leuchtdichte zu erreichen. Eine Reduktion der Emissionsfläche auf etwa 65 % der LED-Fläche hätte eine optimale Étendueanpassung zur Folge und könnte die Leuchtdichte voraussichtlich um 30 % erhöhen.

Die Resultate der Berechnungen für einen Projektor mit einem 0,65“-DMD und drei LEDs mit einer Emissionsfläche von 8,32 mm<sup>2</sup> sind in Tabelle 4.19 dargestellt. Hier werden die Lichtstromwerte ohne und mit den in dieser Arbeit vorgestellten Steigerungskonzepten aufgelistet. Zum Zwecke der Einheitlichkeit des Weißfarborts mussten die Tastverhältnisse angepasst werden.

Der Vergleich der Werte mit und ohne den Einsatz der erarbeiteten Konzepte zeigt eine deutliche Steigerung des Projektorlichtstroms um rund 33 % bei einem konstanten Weißfarbort.

**Tabelle 4.19:** Farborte, Tastgrade und Projektorlichtströme mit und ohne Steigerungskonzepte.

	<b>Rot</b>	<b>Grün</b>	<b>Blau</b>	<b>Weiß</b>
CIE 1931 x	0,6908	0,3096	0,1444	0,3127
CIE 1931 y	0,3091	0,6395	0,0344	0,3290
<b>Ohne Steigerungskonzepte</b>				
Tastgrad	41 %	40 %	19 %	
Lichtstrom	190 lm	840 lm	50 lm	<b>1080 lm</b>
<b>Mit Steigerungskonzepten</b>				
Verstärkungsfaktor	1,20	1,54	1,30	
Tastgrad	46 %	35 %	19 %	
Lichtstrom	250 lm	1120 lm	60 lm	<b>1440 lm</b>

Demzufolge haben die einzelnen Konzepte, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, zusammengenommen einen signifikanten Einfluss auf den erreichbaren Lichtstrom von LED-Projektoren. Die ermittelten Steigerungen lassen sich auch auf Projektoren übertragen, die ein Mikrodisplay aufweisen, das eine größere Étendue besitzt. Somit wären beispielsweise Projektoren denkbar, die mit einem DMD des Typs DLE660TE und LEDs des Typs OSTAR LE x P3X 01 (12,5 mm<sup>2</sup> Emissionsfläche) funktionieren und mithilfe der Konzepte einen Lichtstrom von weit über 2000 lm erreichen können.

## Kapitel 5

# ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Evaluierung von Konzepten zur Steigerung des Ausgangslichtstroms von LED-Projektoren über die aktuellen Limitierungen hinaus. Der Fokus lag insbesondere auf der Beleuchtungseinheit.

In diesem Rahmen wurde ein Konzept erarbeitet, das auf der Basis des sogenannten Light Recyclings funktioniert und entsprechende Prozesse innerhalb eines LED-Gehäuses umsetzt. Hierbei wird ein Teil der emittierten Strahlung durch ein optisches Element auf die Quelle zurückgeworfen, um die effektive Leuchtdichte zu erhöhen. Mithilfe dieser Methodik wurden experimentell Erhöhungen der Leuchtdichte für alle drei Farben (Rot, Grün und Blau) beobachtet. Hierzu wurde die Emissionsfläche der LEDs durch eine entsprechende Light Recycling Kammer auf dem Chip um die Hälfte reduziert. Während für den blauen und grünen Farbkanal relativ hohe Zugewinne von 39 % bzw. 30 % ermittelt wurden, konnte die Leuchtdichte des roten Farbkanals lediglich um einen Wert von 10 % verbessert werden.

Ein weiteres Konzept behandelte die Erhöhung der Intensität der Anregung des Konverters der grünen LED. Die Strahlung einer weiteren blauen LED wurde über ein optisches System auf die Oberseite des Konverters gelenkt. Die anregende Strahlung im blauen Spektralbereich und die generierte Strahlung im grünen Wellenlängen-

bereich wurden durch einen dichroitischen Filter separiert. Der Ansatz nutzt die systemseitig bereits vorhandenen optischen Elemente, wodurch das Konzept sehr einfach in ein Beleuchtungssystem integriert werden kann. Experimentell wurde eine Erhöhung der Leuchtdichte des grünen Farbkanals um 40 % bestätigt.

Zusätzlich wurden weitere Ansätze entwickelt, die sich speziell dem roten Farbkanal widmeten, der durch eine sehr temperatursensitive rote AlInGaP-LED repräsentiert wird. Die experimentelle Untersuchung einer alternativen Nutzung von Konversionselementen, die Licht im roten Wellenlängenbereich erzeugen, zeigte nach einer theoretischen Optimierung der spektralen Eigenschaften nur marginale Vorteile gegenüber der direkten AlInGaP-LED auf. Auch eine theoretische Betrachtung der Verbesserung der Kühlung einer roten AlInGaP-LED durch den Einsatz eines Peltiermoduls legte nur sehr geringe Verbesserungen dar, während die Systemeffizienz stark abnahm.

Eine Evaluierung der Einflüsse der Pulsfrequenz auf den emittierten Lichtstrom der roten AlInGaP-LED wies dagegen deutlich positivere Ergebnisse auf. Der Effekt konnte sowohl in einer entsprechenden Simulation, als auch innerhalb des Experiments nachgewiesen werden. Der Zugewinn betrug bis zu 20 % bei einer Erhöhung der Pulsfrequenz von 240 Hz auf 1920 Hz.

Das Übertragen der Konzepte auf ein passendes Projektormodell resultierte in einer signifikanten Steigerung des Ausgangslichtstroms um 33 %, während der Weißpunkt (0,3217/0,3290) konstant gehalten wurde. Erreicht wurde diese Zunahme durch die Erhöhung der Pulsfrequenz, die zusätzliche Anregung des grünen Konverters und

das Anwenden des Light Recycling Konzepts auf den blauen Farbkanal. Weiterhin konnte im Modell eine vollständige Abdeckung des Rec.709-Farbraums erreicht werden. Die Validierung der Ergebnisse in einem realen Projektionssystem konnte bisher nicht durchgeführt werden, wird jedoch voraussichtlich in einer weiterführenden Arbeit realisiert.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass LED-basierte Projektoren von den aufgezeigten Methoden profitieren, da deren Lichtstrom signifikant erhöht werden kann, ohne ein größeres Mikrodisplay verwenden zu müssen.

Weiterhin ist zu konkludieren, dass eine Umsetzung der erarbeiteten Methoden LED-Projektoren ermöglicht, die sowohl einen Lichtstrom von deutlich über 2000 lm erzeugen, als auch die Farbanforderungen nach Rec.709 erfüllen können. Derartige LED-basierte Projektionssysteme entsprechen demnach auch den Helligkeitsanforderungen anspruchsvollerer Anwendungsumgebungen. Dazu gehören beispielsweise gut ausgeleuchtete Büro- und Seminarräume, welche Lichtströme zwischen 2000 und 3000 lm erfordern.

Derartige Anwendungsgebiete werden derzeit von quecksilberhaltigen Höchstdruckgasentladungslampen dominiert. Längerfristig betrachtet werden derartige Lichtquellen durch Halbleiterlichtquellen ersetzt werden, da diese viele vorteilhafte Eigenschaften in das System einbringen (u.a. hohe Lebensdauer, gesättigte Farben, verzögerungsfreies Einschalten).

Diese Dissertation trägt einen wichtigen Teil zur LED-Projektion für verschiedene Anwendungsgebiete im privaten und beruflichen Alltag

bei. Die Ergebnisse der Arbeit können dazu beitragen, LED-Projektoren zur bevorzugten Alternative gegenüber lampenbasierten Lösungen weiterzuentwickeln.

# Anhang A

## BERECHNUNGEN

### A.1 EFFEKTIVER LICHTSTROM DES KONVERTER-LED-MODELLS

Das gemessene Spektrum der Konverter-LED wird zunächst einer entsprechenden Modell-Spektralfunktion angenähert:

$$S_0(\lambda, \lambda_{peak}, \Delta\lambda) = S_{mess}(\lambda) \quad (\text{A.1})$$

Das Integral dieser Modellfunktion über die Wellenlängen ist proportional zur geforderten Strahlungsleistung der Konverter-LED  $\Phi_{KLED}$ . Diese entspricht dem Strahlungsfluss der anregenden (blauen) LED  $\Phi_{blau}$  multipliziert mit der Konversionseffizienz  $\eta_{konv}$ :

$$\Phi_{KLED} = \Phi_{blau} \eta_{konv} = g \cdot \int_{\lambda} S_0(\lambda, \lambda_{peak}, \Delta\lambda) d\lambda \quad (\text{A.2})$$

Der Gewichtungsfaktor  $g$  kann folglich berechnet werden mit:

$$g = \frac{\Phi_{blau} \eta_{konv}}{\int_{\lambda} S_0(\lambda, \lambda_{peak}, \Delta\lambda) d\lambda} \quad (\text{A.3})$$

Die Konversionseffizienz setzt sich aus dem Stokes-Faktor  $\eta_{Stokes}$ , dem Absorptionskoeffizienten  $\eta_{absorb}$ , der Quanteneffizienz  $\eta_{QE}$  und dem Quenchingfaktor  $\eta_{quench}$  zusammen:

$$\eta_{konv} = \eta_{Stokes} \eta_{absorb} \eta_{QE} \eta_{quench} \quad (A.4)$$

Der Stokes-Faktor errechnet sich aus dem Quotienten der Schwerpunktwellenlängen des anregenden Spektrums und des Spektrums der Konverter-LED:

$$\eta_{Stokes} = \frac{\lambda_{c,blau}}{\lambda_{c,KLED}} = \frac{\int_{\lambda} \lambda S_{blau}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \lambda S_{KLED}(\lambda) d\lambda} \quad (A.5)$$

Im letzten Schritt der Berechnung des Lichtstroms muss das spektrale photometrische Strahlungsäquivalent

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} V(\lambda) \quad (A.6)$$

einbezogen werden:

$$\Phi_{v,KLED} = g \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} K(\lambda) S_0(\lambda, \lambda_{peak}, \Delta\lambda) d\lambda \quad (A.7)$$

Für die Berechnung des effektiven Lichtstroms nach einem Filter muss außerdem die entsprechende Filterfunktion  $S_{filter}(\lambda)$  berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned} & \Phi_{v,KLED,eff} \\ &= g \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} K(\lambda) S_{filter}(\lambda) S_0(\lambda, \lambda_{peak}, \Delta\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (A.8)$$



## A.2 BERECHNUNG DES LED-PELTIER-MODELLS

Zunächst wird die Sperrschichttemperatur der LED berechnet. Diese setzt sich für das Referenzmodell wie folgt zusammen

$$T_j = \overline{\dot{Q}}_c (R_{th,LED} + R_{th,hs}) + T_{amb} \quad (\text{A.9})$$

Der erzeugte mittlere Wärmestrom berechnet sich durch:

$$\overline{\dot{Q}}_c(T_j) = P_{el,LED}(T_j) - \Phi(T_j) = I_f U_f(T_j) d - \Phi(T_j) \quad (\text{A.10})$$

Die temperaturabhängigen Werte der Durchlassspannung und der Strahlungsleistung werden folgendermaßen ausgedrückt:

$$U_f(T_j) = a_{1,Uf} T_j + a_{0,Uf} \quad (\text{A.11})$$

$$\Phi_e(T_j) = a_{1,\Phi} T_j + a_{0,\Phi} \quad (\text{A.12})$$

Die Formeln (A.10), (A.11) und (A.12) eingesetzt in (A.9) aufgelöst nach  $T_j$  ergeben:

$$T_j [^\circ\text{C}] = \frac{T_{amb} + (R_{th,LED} + R_{th,hs}) (a_{0,Uf} I_f d - a_{0,\Phi e})}{1 - (R_{th,LED} + R_{th,hs}) (a_{1,Uf} I_f d - a_{1,\Phi e})} \quad (\text{A.13})$$

Analog lässt sich die Gleichung für das Peltiermodell aufstellen:

$$T_j [^\circ\text{C}] = \frac{T_c + R_{th,LED} (a_{0,Uf} I_f d - a_{0,\Phi e})}{1 - R_{th,LED} (a_{1,Uf} I_f d - a_{1,\Phi e})} \quad (\text{A.14})$$

Hiermit lassen sich alle Größen ableiten, die von der Sperrschichttemperatur abhängen.

Die Temperatur der Heiseite ergibt aus folgender Gleichung

$$T_h = T_{amb} + \dot{Q}_h R_{th,hs} \quad (\text{A.15})$$

Wobei gilt

$$\dot{Q}_h = \bar{Q}_c + P_{el,TEC} = \bar{Q}_c + \frac{\bar{Q}_c}{COP_{opt}} = \dot{Q}_c \left( 1 + \frac{1}{COP_{opt}} \right) \quad (\text{A.16})$$

Für die Berechnung des optimalen COP erfolgt durch

$$COP_{opt} = \frac{T_{ave} \sqrt{1 + Z(T_{ave}) T_{ave}} - 1}{\Delta T \sqrt{(1 + Z(T_{ave}) T_{ave}) T_{ave}} + 1} - 0.5 \quad (\text{A.17})$$

$$T_{ave}[\text{K}] = \frac{T_h[\text{K}] + T_c[\text{K}]}{2} \quad (\text{A.18})$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (\text{A.19})$$

Der materialabhängige Parameter  $Z(T_{ave})$  kann wie folgt als Funktion der mittleren Temperatur ausgedrückt werden (quadratische Näherung der Daten aus [58]):

$$Z(T_{ave}) = 5,238 \cdot 10^{-9} T_{ave}^2 - 1,474 \cdot 10^{-5} T_{ave} + 6,664 \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.20})$$

Aus den gegebenen Gleichungen (A.15) bis (A.20) lassen sich Werte des COP und der Temperatur der Heiseite sehr komfortabel mithilfe einer iterativen Berechnung ermitteln.

## Anhang B

# ABKÜRZUNGEN & SYMBOLE

## B.1 ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Bedeutung
AlInGaP	Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid, Halbleitermaterial für Emittoren im rot-orangen Spektralbereich
AR	Erweiterte Realität, <i>engl. augmented reality</i>
CCT	Ähnlichste Farbtemperatur, <i>engl. correlated color temperature</i>
CIE	Internationale Beleuchtungskommission, <i>frz. Commission Internationale d'Eclairage</i>
COP	Leistungsfaktor eines Peltierelements, <i>engl. coefficient of performance</i>
CPC	Parabolische Lichtsammeloptik, <i>engl. compound parabolic concentrator</i>
DLP	Markenname für DMD-Produkte der Firma Texas Instruments, <i>engl. digital light processing</i>
DMD	Digitales Mikrospiegelarray, <i>engl. digital micromirror device</i>
HUD	Head-Up Display
HLD	Leuchtdichtesteuerungskonzept der Firma Philips Lighting, <i>engl. high lumen density</i>
InGaN	Indium-Gallium-Nitrid, Halbleitermaterial für Emittoren im blau-grünen Spektralbereich

LCD	Transmittives Flüssigkristalldisplay, <i>engl. liquid crystal display</i>
LCoS	Reflektierendes Flüssigkristalldisplay, <i>engl. liquid crystal on silicon</i>
LED	Lichtemittierende Diode, <i>engl. light-emitting diode</i>
LuAG	Lutetium-Aluminium-Granat
Rec.709	Empfehlung der Internationalen Telekommunikationsunion (ITU)
TIR	Totale interne Reflexion
TRP	Typ eines Mikrospiegels der Fa. Texas Instruments, <i>engl. tilt-and roll pixel</i>
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

---

## B.2 SYMBOLE

Symbol	Bedeutung
$\varepsilon$	Étendue
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_{dom}$	Dominante Wellenlänge
$\Phi$	Strahlungsleistung/-fluss
$\Phi_v$	Lichtstrom
$\Omega$	Raumwinkel
A	Flächeninhalt
$C_v$	(Bild-) Kontrast
$C_{v,P}$	Projektorkontast
$E_v$	Beleuchtungsstärke
$I_f$	Stromstärke in Durchlassrichtung
$K(\lambda)$	Spektrales photometr. Strahlungsäquivalent
L	Strahldichte
$L_v$	Leuchtdichte
M	Spezifische Ausstrahlung

---

---

$M_v$	Spezifische Lichtausstrahlung
$n$	Brechungsindex
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$R$	Reflektivität
$R_{th}$	Thermischer Widerstand
$T_{amb}$	Umgebunstemperatur
$T_c$	Temperatur der Kaltseite eines Peltiermoduls
$T_h$	Temperatur der Heiseite eines Peltiermoduls
$T_{hs}$	Klkrpertemperatur
$T_j$	Sperrschichttemperatur
$U_f$	Durchlassspannung
$V(\lambda)$	Spektrale Augenempfindlichkeit für Tagsehen
$Z_{th}$	Thermische Impedanz

---



# DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen denjenigen bedanken, die zu dem Gelingen dieser Doktorarbeit beigetragen und mich während meiner Doktorandenzeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Cornelius Neumann für die Annahme der Arbeit, seine Unterstützung durch konstruktive Gespräche und sein Vertrauen während des gesamten Zeitraums. Prof. Dr. Wilhelm Stork möchte ich meinen herzlichen Dank für die Übernahme des Korreferats aussprechen.

Bedanken möchte ich mich bei der Firma OSRAM OS, die mich während meiner gesamten Studienzeit begleitete und diese Dissertation erst ermöglichte. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch meinem Vorgesetzten Dr. Alexander Martin, der mir die nötigen Freiheiten ließ, um die Arbeit bestmöglich durchführen zu können.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Stefan Morgott für die fachliche und persönliche Unterstützung. Die zahlreichen, oft sehr kurzfristigen und trotzdem sehr intensiven Gespräche über verschiedene Themen rund um die LED-Projektion haben einen immensen Teil zum Verständnis des Systems beigetragen und waren für die Arbeit unverzichtbar.

Besonders herzlich danken möchte ich meiner Ehefrau Lisa, die mich zum einen als Korrekturleserin unterstützte und zum anderen durch die zahlreichen „Täler der Tränen“ geleitete, die die Doktorarbeit mit sich brachte.

Zuletzt danke ich meiner Familie, der Familie meiner Frau Lisa und meinen Freunden, die in allen Lebenslagen für mich da sind.



# LITERATUR

- [1] Leighton, L. J., Crompton, H. (2017). Augmented Reality in K-12 Education. In: Mobile Technologies and Augmented Reality in Open Education. Tomei, L., Kurubacak, G., Altinpulluk, H. (Hrsg.). IGI Global, 281–290.
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2017). HoloMed - Kontextsensitive Unterstützung eines Chirurgen im Operationsaal durch Augmented Reality. BMBF-Fördermaßnahme. [http://www.bmbf-softwareforschung.de/media/content/Projektblatt\\_HoloMed.pdf](http://www.bmbf-softwareforschung.de/media/content/Projektblatt_HoloMed.pdf) (letzter Zugriff am 26.2.2018).
- [3] Microsoft (2017). The World's First Holographic Head-Mounted Display | Microsoft HoloLens. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware> (letzter Zugriff am 2.1.2018).
- [4] Rolland, J. P., Thompson, K. P., Bauer, A., Urey, H., Thomas, M. (2016). See-Through Head-Worn Display (HWD) Architectures. In: Handbook of Visual Display Technology. Chen, J., Cranton, W., Fihn, M. (Hrsg.). Springer International Publishing, Cham, 2929–2961.
- [5] Texas Instruments (2016). TI DLP Technology for 3D Printing. Design scalable high-speed stereolithography systems using TI DLP technology. <http://www.ti.com/lit/sg/dlpt019e/dlpt019e.pdf> (letzter Zugriff am 2.1.2018).

- [6] Texas Instruments (2017). Enabling the Next Generation of Automotive Head-Up Displays Systems. Application Report DLPA043A - October 2013 - Revised November 2017.  
<http://www.ti.com/lit/an/dlpa043a/dlpa043a.pdf> (letzter Zugriff am 2.1.2017).
- [7] Daimler AG (2017). "DIGITAL LIGHT": Mercedes-Benz Scheinwerfer in HD-Qualität. <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/digital-light-scheinwerfer-in-hd-qualitaet/> (letzter Zugriff am 2.1.2018).
- [8] Samsung (2005). Specifications SP-P300ME.  
[http://www.projectorcentral.com/pdf/projector\\_spec\\_3350.pdf](http://www.projectorcentral.com/pdf/projector_spec_3350.pdf) (letzter Zugriff am 26.2.2018).
- [9] Brennesholtz, M. S., Stupp, E. H. (2008). Projection displays, 2. Aufl. Wiley, Chichester u.a.
- [10] International Telecommunication Union (2015). Recommendation ITU-R BT.709-6 (06/2015). Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. BT Series Broadcasting service (television).  
[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf).
- [11] Hornbeck, L. J. (1997). Digital Light Processing for high-brightness high-resolution applications. In: Electronic Imaging '97. Wu, M. H. (Hrsg.). SPIE, 27–40.
- [12] Texas Instruments (2017). DLP650NE 0.65 1080p S600 DMD. DLPS097 - August 2017.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp650ne.pdf> (letzter Zugriff am 15.1.2018).

- [13] Texas Instruments (2017). DLP660TE 0.66 4K UHD DMD. DLPS072 - January 2017.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp660te.pdf> (letzter Zugriff am 9.1.2017).
- [14] Bhowmik, A. K., Li, Z., Bos, P. J. (2008). Mobile displays. Technology and applications. J. Wiley & Sons, Chichester, England, Hoboken, NJ.
- [15] Texas Instruments (2010). DLP System Optics. Application Report DLPA022 - July 2010.  
<http://www.ti.com/lit/an/dlpa022/dlpa022.pdf> (letzter Zugriff am 11.1.2018).
- [16] Bass, M., DeCusatis, C., Li, G., MacDonald, C. A., van Stryland, E. W. Handbook of optics, 3. Aufl. McGraw-Hill, New York.
- [17] Chaves, J. (2008). Introduction to nonimaging optics. CRC Press, Boca Raton.
- [18] Baer, R., Barfuß, M., Seifert, D. (2016). Beleuchtungstechnik. Grundlagen, 4. Aufl.
- [19] Internationale Beleuchtungskommission (2007). Measurement of LEDs, 2. Aufl. CIE, Vienna.
- [20] Deutsches Institut für Normung (2003). DIN EN 61947-1:2002. Elektronische Projektion - Messung und Dokumentation wichtiger Leistungsmerkmale. Teil 1: Projektoren fester Auflösung (IEC 61947-1:2002).
- [21] Texas Instruments (2015). Persönliche Kommunikation mit verschiedenen Mitarbeitern der Firma TI zum Thema DLP. Gespräche und E-Mails. Regensburg (D) / Dallas, Texas (USA).
- [22] Texas Instruments (2017). DLP470NE 0.47 1080P DMD. DLPS091 - August 2017.

- <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp470ne.pdf> (letzter Zugriff am 15.1.2018).
- [23] Schmidt, U. (2013). Professionelle Videotechnik. Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, 6. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg.
- [24] David C. Hutchinson (2005). Introducing BrilliantColor™ Technology.
- [25] Guoxin He, L. Z. (2010). A model for LED spectra at different drive currents. *Chin. Opt. Lett.* **8/11**, 1090–1094.
- [26] Kim, J.-H. (1998). Design method of dichroic filter using color appearance model in LCD projection systems. *Opt. Eng* **37/11**, 3031.
- [27] PMA Research (2018). Worldwide Projector Forecast. Januar 2018.
- [28] Brennesholtz, M. S. (1996). Light collection efficiency for light valve projection systems. In: *Electronic Imaging: Science & Technology*. Wu, M. H. (Hrsg.). SPIE, 71–79.
- [29] Derra, G., Moench, H., Fischer, E., Giese, H., Hechtfisher, U., Heusler, G., Koerber, A., Niemann, U., Noertemann, F.-C., Pekarski, P., Pollmann-Retsch, J., Ritz, A., Weichmann, U. (2005). UHP lamp systems for projection applications. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38/17**, 2995–3010.
- [30] Kobayashi, M., Yoshida, A., Yoshida, Y. (2011). An evaluation of perceived color break-up on field-sequential color displays. In: *IS&T/SPIE Electronic Imaging*. Rogowitz, B. E., Pappas, T. N. (Hrsg.). SPIE, 786514.

- [31] Bachmann, F., Loosen, P. (approximately 2011). High power diode lasers. Technology and applications, 1. Aufl. Springer, New York, NY.
- [32] OSRAM Opto Semiconductors (2016). Blue Laser Diode in TO56 Package. PL TB450B.
- [33] Raukas, M., Kelso, J., Zheng, Y., Bergenek, K., Eisert, D., Linkov, A., Jermann, F. (2012). Ceramic Phosphors for Light Conversion in LEDs. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* **2/2**, R3168-R3176.
- [34] Lenef, A., Kelso, J., Zheng, Y., Tchoul, M. (2013). Radiance limits of ceramic phosphors under high excitation fluxes. In: *SPIE Optical Engineering + Applications*. Johnson, R. B., Mahajan, V. N., Thibault, S. (Hrsg.). SPIE, 884107.
- [35] Maeda, Y., Imai, Y., Ishige, M., Kobayashi, I., Murakami, K., Mochizuki, T., Nomura, T., Kikuchi, H. (2015). 25.2. High-Brightness Solid-State Light Source for 4k Ultra-Short-Throw Projector. *SID Symposium Digest* **46/1**, 362–364.
- [36] Morimoto, K., Kasugai, H., Takizawa, T., Yoshida, S., Yamanaka, K., Katayama, T., Okuyama, K., Shiraishi, S., Mizuyama, Y. (2013). 60.2. A 30 W Pure Blue Emission with NUV Laser-Diode-Pumped Phosphor for High-Brightness Projectors. *SID Symposium Digest* **44/1**, 832–835.
- [37] Lenef, A., Kelso, J., Tchoul, M., Mehl, O., Sorg, J., Zheng, Y. (2014). Laser-activated remote phosphor conversion with ceramic phosphors. In: *SPIE Optical Engineering + Applications 2014*. Kane, M. H., Jiao, J., Dietz, N., Huang, J.-J. (Hrsg.). SPIE, 91900C.

- [38] Bachmann, V., Ronda, C., Meijerink, A. (2009). Temperature Quenching of Yellow Ce<sup>3+</sup> Luminescence in YAG. Ce. Chem. Mater. **21**/10, 2077–2084.
- [39] Daniels, M., Mehl, O., Hartwig, U. (2015). Laser-activated remote phosphor light engine for projection applications. In: SPIE Optical Engineering + Applications 2015. Johnson, R. B., Mahajan, V. N., Thibault, S. (Hrsg.). SPIE, 95780N.
- [40] OSRAM Opto Semiconductors (2016). OSRAM OSTAR Projection Power LE A P1W. Datasheet. Version 1.11. <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2494097/LE%20A%20P1W.pdf> (letzter Zugriff am 2.3.2018).
- [41] OSRAM Opto Semiconductors (2016). OSRAM OSTAR Projection Power LE A P2W. Datasheet. Version 2.8. <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2494106/LE%20A%20P2W.pdf> (letzter Zugriff am 2.3.2018).
- [42] OSRAM Opto Semiconductors (2016). OSRAM OSTAR Projection Power LE A P3W 01. Datasheet. Version 1.0. <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2494118/LE%20A%20P3W%2001.pdf> (letzter Zugriff am 2.3.2018).
- [43] Schubert, E. F. (2018). Light-emitting diodes, 3. Aufl. E. Fred Schubert, New York, NY.
- [44] Boer, D. K. G. de, Bruls, D., Hoelen, C., Jagt, H. (2017). High lumen density sources based on LED-pumped phosphor rods. Opportunities for performance improvement. In: Sixteenth International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems. Dietz, N., Ferguson, I. T. (Hrsg.). SPIE, 22.

- [45] Hoelen, C., Boer, D. de, Bruls, D., van der Eyden, J., Koole, R., Li, Y., Mirsadeghi, M., Vanbroekhoven, V., van den Bergh, J.-J., van de Voorde, P. (2016). LED light engine concept with ultra-high scalable luminance. In: SPIE OPTO 2016. Jeon, H., Tu, L.-W., Krames, M. R., Strassburg, M. (Hrsg.). SPIE, 976810.
- [46] Beeson, K., Zimmerman, S., Livesay, W., Ross, R., Livesay, C., Livesay, K. (2006). 61.5. LED-Based Light-Recycling Light Sources for Projection Displays. SID Symposium Digest **37/1**, 1823.
- [47] Fu, L., Leutz, R., Ries, H. (2005). Light recycling in solid state devices. In: Optics & Photonics 2005. Ferguson, I. T., Carrano, J. C., Taguchi, T., Ashdown, I. E. (Hrsg.). SPIE, 59411L.
- [48] Ouyang, G., Li, K. (2007). 14.2. A General Theory of Light Recycling with Light Pipes/Tunnels and Their Applications in LED Illuminators. SID Symposium Digest **38/1**, 951–954.
- [49] Ouyang, G., Li, K. (2008). P-236. LED Light Recycling with Recycling Collars. SID Symposium Digest **39/1**, 2091.
- [50] Ouyang, G., Zugby, L., Li, K. (2009). P-169. LED Light Recycling: Some General Design Guidelines. SID Symposium Digest **40/1**, 1756.
- [51] Schulz, B. (2016). Applikationsnahe Charakterisierung von Hochleistungs-LEDs für Projektionsanwendungen. In: Licht 2016. Karlsruhe, 25.-28. September : Tagungsband - Proceedings. Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.), 442–447.
- [52] Schulz, B., Neumann, C. (2017). Enhancing the luminance of converted green LEDs in LED projectors. *Advanced Optical Technologies* **6/1**, 3168.

- [53] Hickl, P., Ngo, M. N. (2015). Boosting the Brightness of an LED Projector by Adding a Laser Light Source. In: 22nd International Display Workshops (IDW '15). Otsu, Japan, 9-12 December 2015, 1044–1047.
- [54] OSRAM Opto Semiconductors (2016). Thermische Simulationen von Höchstleistungs-LEDs. Gespräche und E-Mails. Regensburg.
- [55] OSRAM Opto Semiconductors (2017). OSRAM OSTAR Projection Power LE CG P2A. Datasheet. Version 1.2. <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2494067/LE%20CG%20P2A.pdf> (letzter Zugriff am 12.4.2018).
- [56] OSRAM Opto Semiconductors (2017). OSRAM OSTAR Projection Power LE B P1W. Datasheet. Version 1.13. <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-4464981/LE%20B%20P1W.pdf> (letzter Zugriff am 18.4.2018).
- [57] OSRAM Opto Semiconductors (2016). OSRAM OSTAR Projection Power LE CG P1A. Datasheet. Version 1.2. <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2494115/LE%20CG%20P1A.pdf> (letzter Zugriff am 16.4.2018).
- [58] Laird Technologies (2010). Thermoelectric Handbook. THR-BRO-THERMOELECTRIC-HNDBK 0110. <https://assets.lairdtech.com/home/brandworld/files/THR-BRO-Thermal%20Handbook%200110.pdf> (letzter Zugriff am 22.4.2018).
- [59] Schulz, B., Morgott, S. (2017). The impact of the driving frequency on the output flux of high-power InGaAlP-LEDs during high-current pulsed operation. In: Sixteenth



International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems. Dietz, N., Ferguson, I. T. (Hrsg.). SPIE, 24.

- [60] Lockett, R. A., Bell, H. A., Priston, R. (1965). Thermal Resistance of Low Power Semiconductor Devices under Pulse Conditions. Mullard Techn. Comm. No. 76.
- [61] Infineon Technologies (2015). AN 2015-10. Transient Thermal Measurements and thermal equivalent circuit models. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN2015\\_10\\_Thermal\\_equivalent\\_circuit\\_models-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011aa65358394dd2](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN2015_10_Thermal_equivalent_circuit_models-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011aa65358394dd2) (letzter Zugriff am 30.4.2018).



## **SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK**

Lichttechnisches Institut Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

---

- Band 1     Christian Jebas  
**Physiologische Bewertung aktiver und passiver  
Lichtsysteme im Automobil.** 2012  
ISBN 978-3-86644-937-4
- Band 2     Jan Bauer  
**Effiziente und optimierte Darstellungen von  
Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.** 2013  
ISBN 978-3-86644-961-9
- Band 3     Christoph Kaiser  
**Mikrowellenangeregte quecksilberfreie  
Hochdruckgasentladungslampen.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0039-1
- Band 4     Manfred Scholdt  
**Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der  
Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0044-5
- Band 5     André Domhardt  
**Analytisches Design von Freiformoptiken  
für Punktlichtquellen.** 2013  
ISBN 978-3-7315-0054-4
- Band 6     Franziska Herrmann  
**Farbmessung an LED-Systemen.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0173-2
- Band 7     Simon Wendel  
**Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0251-7
- Band 8     Carmen Kettwich  
**Ablenkung im Straßenverkehr und deren  
Einfluss auf das Fahrverhalten.** 2014  
ISBN 978-3-7315-0288-3

- Band 9      Steffen Michenfelder  
**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines  
automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis  
von Digitalprojektoren.** 2015  
ISBN 978-3-7315-0301-9
- Band 10     Celal Mohan Ögün  
**Surface wave driven molecular low pressure plasmas  
for general lighting.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0464-1
- Band 11     Theresa Bonenberger  
**LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0480-1
- Band 12     Michael Schöne  
**Diffraktive Optiken im Automobil:  
Achromatisierung, Athermalisierung, Formung  
von Scheinwerferlichtverteilungen.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0613-3
- Band 13     Tobias Werner  
**Simulation, Aufbau und Charakterisierung  
von autostereoskopischen Display-Systemen  
im Fahrzeugbereich.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0617-1
- Band 14     Christian Herbold  
**Entwicklung und Herstellung naturähnlich  
verzweigter Kühlkörper für LED-Systeme.** 2017  
ISBN 978-3-7315-0635-5
- Band 15     Carsten Gut  
**Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0710-9
- Band 16     Annie Shalom Samji Isaac Chandra  
**Intelligent Freeform Deformation for LED  
Illumination Optics.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0741-3

- Band 17    Ingo Rotscholl  
**Spectral near field data of LED systems  
for optical simulations.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0750-5
- Band 18    Inca Leopoldo Sayanca  
**Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei  
kamerabasierter Farbverteilungsmessung.** 2018  
ISBN 978-3-7315-0830-4
- Band 19    Benjamin Schulz  
**Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit  
LED-basierter Projektionssysteme.** 2019  
ISBN 978-3-7315-0865-6



Lichttechnisches Institut  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften haben sich LEDs innerhalb des vergangenen Jahrzehnts in verschiedenen Anwendungen, darunter auch digitalen Projektoren („Beamer“), erfolgreich etabliert.

Diese Arbeit befasst sich mit dem maximal erreichbaren Ausgangslichtstrom von LED-Projektoren, welcher durch die physikalischen Gegebenheiten im System begrenzt wird. Mit dem Ziel, den Ausgangslichtstrom weiter zu steigern, wird die Beleuchtungseinheit LED-basierter Projektoren durch die Verbesserung bestehender Technologien und die Ausarbeitung neuer Konzepte systematisch weiterentwickelt.

ISSN 2195-1152  
ISBN 978-3-7315-0865-6

