

Laserscheinwerfer im Automobil – Scannendes Lasersystem mit eindimensionalem Facettenreflektor

Jan Müller, Marcel Bursy, Jörg Wallaschek

Karlsruher Institut für Technologie; L-LAB, Lippstadt; Leibniz Universität Hannover
uxdrs@student.kit.edu, marcel.bursy@l-lab.de

Abstract/Zusammenfassung

Eine Möglichkeit hochauflösende Scheinwerfer im Automobil umzusetzen, sind scannende Systeme. Scannen bedeutet, dass ein Strahl von einer Ablenkeinheit umgelenkt wird, sodass ein Winkelbereich beleuchtet wird. Durch Modulation der Lichtquelle werden aus dem Winkelbereich nur die Winkel ausgewählt, die zur Erzeugung der Ziellichtverteilung beitragen. Damit die Lichtverteilung als statisch wahrgenommen wird, muss sich der Strahl ausreichend schnell bewegen.

Das vorliegende Konzept verfolgt eine Ablenkung in einer Dimension. Der Strahl bewegt sich entlang einer Linie. Eine facettierte Optik verteilt das Licht, sodass die Ziellichtverteilung entsteht. Durch die Ablenkung in nur einer Dimension fallen die Anforderungen an das mechanische System und die Modulation der Lichtquelle moderater aus als bei vergleichbaren 2D-Scannern.

Hauptaufgabe ist das Design der facettierten Optik. Weiterhin muss eine geeignete Lichtquelle gefunden und ein Beleuchtungspfad entworfen werden.

Index Terms: Automobilbeleuchtung, Facettenreflektor, Laser, Scannende Systeme

1 Einleitung

Hochauflösende Scheinwerfer werden im Automobil zur Umsetzung adaptiver Lichtfunktionen genutzt. Die aktuellen technischen Realisierungsmöglichkeiten umfassen LCD, DMD, LED und Scanner [1]. Dieses Paper befasst sich mit der Umsetzung der Scanner-Technologie. Hierbei wird ein Laser mithilfe eines beweglichen Spiegels so schnell abgelenkt, dass die Ablenkbewegung nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Ziel der Arbeit ist es, ein System aufzubauen, das den Laserstrahl nur in einer Richtung ablenkt und mithilfe einer facettierten Optik eine zweidimensionale Beleuchtung generiert. Die Lichtverteilung soll durch Modulation des Lasers angepasst werden. Die Herausforderung ist es, nachzuweisen, dass dieses Vorhaben technisch umsetzbar ist. Dabei kommt es auf die Wahl der Lichtquelle und die Auslegung der Optiken an.



2 Scannende Systeme

Um Scannende Systeme zu beschreiben, werden diese zuerst von anderen Technologien für hochauflösende Scheinwerfer abgegrenzt. Kauschke, Götz und Gut [1], [2], [3] unterscheiden im Wesentlichen vier Technologien: LCD (LCoS), Mirror Devices (AMD und DMD), Matrix-LED (μ AFS) und Scanner. Drei Eigenschaften zeichnen in der Regel scannende Systeme aus [1]:

- additives Prinzip,
- strahlgeführte Modulation,
- kontinuierliche Ansteuerung.

Scanner und LED basieren im Gegensatz zu LCD und DMD auf dem additiven Prinzip. Das heißt es wird nur Licht erzeugt, wo es gebraucht wird. Wird der zu beleuchtende Bereich mit ausreichend hoher Geschwindigkeit abgescannt, nimmt der Betrachter die dynamische Ablenkung nicht wahr. Dieser kontinuierliche Ablenkprozess führt auch dazu, dass es keine Pixel gibt.

Ein Scannendes System ist mindestens aus zwei Elementen aufgebaut: einer Lichtquelle und einer Ablenkeinheit. Zusätzliche optische Elemente dienen der Fokussierung und Verteilung des Lichtes. Die Lichtquelle besteht meist aus einem oder mehreren Lasern, da nur Laser eine Étendue haben, die es erlaubt die benötigten kleinen Optiken auszuleuchten. Um weißes Licht zu erzeugen gibt es die Möglichkeit blaues Licht mit Hilfe des Stokes Shift in einem Leuchtstoff teilweise umzuwandeln, sodass weißes Licht durch additive Farbmischung resultiert. Alternativ führt die Kombination aus einem roten, einem grünen und einem blauen Laser ebenfalls zu weißem Licht durch additive Farbmischung [1]. Die RGB Variante hat den Vorteil einer besseren Strahlqualität und einer variablen Lichtfarbe. Ein Polygonrad oder ein Galvanometer besitzen drehende spiegelnde Flächen und lenken damit Licht in einer Dimension ab. Eine Ablenkung in zwei Richtungen ist mit Hilfe eines MOEMS-Spiegels möglich. Die Ablenkeinheiten sind in Abbildung 1 dargestellt.

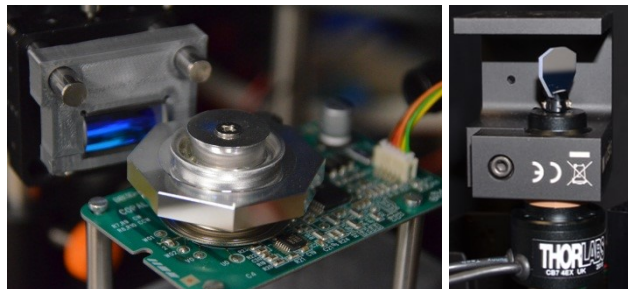


Abbildung 1: Ablenkeinheiten: Polygonrad und Galvanometer.

2.1 Vorteile

Durch das additive Prinzip haben Scanner grundsätzlich das Potential effizienter als Mirror Devices und LCD zu sein. Licht wird dabei nur an den Stellen generiert, wo es gebraucht wird. Mirror Devices lenken Licht auf einen Absorber. LCDs bestehen aus einem Polarisator und einem Analysator an denen Licht selektiert und absorbiert wird.

Die Arbeit mit einem Laser ermöglicht die Verwendung kleiner Optiken aufgrund der hohen Strahlqualität. Bedeutung haben kleine Optiken als Designmerkmal und im Package.

2.2 Nachteile

Die Ablenkeinheit kann sich durch mechanische Einwirkungen, zum Beispiel beim Fahren, dejustieren. Stöße können eine Rejustage notwendig machen.

Die Ablenkung in zwei Dimensionen hat neben dem Nachteil einer zweiten oder komplizierten Ablenkeinheit den Nachteil einer größeren Scanfrequenz in der zweiten Dimension. Durch Anlegen zweier Harmonischen mit unterschiedlicher Frequenz entstehen Trajektorien in Form von Lissajous Figuren. Andere Anregungen werden durch Bézier Kurven beschrieben. Daraus ergeben sich zwei Herausforderungen: Erstens muss der gesamte Bereich abgedeckt sein. Zweitens darf kein Flimmern entstehen. Das heißt, das gesamte Bild muss sich mit einer Frequenz von mindestens 30 Hz wiederholen. Diese 30 Hz gelten für statische Anordnungen. Bei dynamischen Anwendungen, wie beim Fahren, tritt der Perlschnureffekt auf, das heißt es muss eine höhere Frequenz von mindestens 200 Hz erreicht werden [4]. Um beide Bedingungen zu erfüllen, müssen die Ablenkfrequenzen hoch gewählt werden [5].

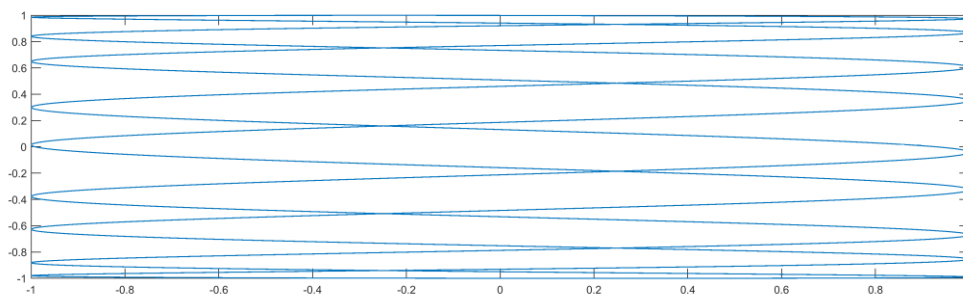


Abbildung 2: Lissajous Figur mit $f_1/f_2 = 9$, $\varphi = \pi/2$.

2.3 Stand der Technik

Das iLaS-Projekt ist eines der vorreitenden Projekte im Bereich Laser Scanning. Im Projekt wurde ein System aus sechs Laser-Dioden, einer eindimensionalen Ablenkeinheit und einem Phosphor-Konverter aufgebaut. Die Laser-Strahlen werden im Beam Combiner parallel ausgerichtet und vertikal angeordnet. Sie durchlaufen ein optisches System und werden von einem MOEMS-Spiegel eindimensional gescannt. Der Phosphor wandelt das blaue Licht teilweise um, sodass weißes Licht entsteht. Das Modul hat insgesamt 16.5 W optische blaue Leistung und erreicht nach der Weißlichtkonvertierung einen Lichtstrom von 1920 lm [6].

3 Eindimensionaler Scanner

Im Folgenden wird das neue System beschrieben. Es werden Konzept und Aufbau eines eindimensionalen Scanners mit facetierter Aufweitungsoptik vorgestellt, dazu werden die verwendeten Baugruppen beschrieben und ihre Bedeutung für die Funktion des Konzepts wird erläutert.

3.1 Konzept

Ziel ist es, ein scannendes System möglichst einfach zu gestalten. Dabei wird eine Ablenkung in einer Dimension genutzt, sodass die Nachteile der Ablenkung in zwei Dimensionen umgangen werden, vergleiche Abschnitt 2.2.

Die Umsetzung gestaltet sich wie folgt: Der Strahl aus einer Lichtquelle wird durch einen Beleuchtungspfad geformt und trifft auf die Ablenkeinheit. Da eine hohe Strahlqualität benötigt wird, kommt als Lichtquelle nur ein Laser in Frage. Die eindimensionale Ablenkeinheit, der Galvanometer, formt den Strahl dynamisch zu einer Linie. Dabei scannt die Ablenkeinheit so schnell, dass die einzelnen Punkte nicht mehr voneinander unterscheidbar sind. Der aufgeweitete Strahl trifft auf eine

letzte Optik, den Facettenreflektor, die den Strahl aufweitet und in verschiedene Richtungen ablenkt. Dabei leuchtet jede Facette einen einzelnen Winkelbereich aus, deren Summe die gesamte Lichtverteilung ergibt.

Die Stärken des Aufbaus liegen in der effizienten Verarbeitung des eindimensional gescannten Lichtes. Die eindimensionale Ablenkung erlaubt es dem Aufbau mit nur einer, weniger komplizierten Ablenkeinheit im Vergleich zum Scannen in zwei Dimensionen auszukommen und die Lichtquelle hat nur eine Lichtaustrittsfläche, sodass eine Ausrichtung mehrerer Lichtstrahlen entfällt. Hinzu kommt, dass beim eindimensionalen Scannen eine Ablenkfrequenz ausreicht, die kleiner ist als beim zweidimensionalen Scannen. Die Frequenz ergibt sich aus der Ablenkeinheit. Wenn die Ablenkeinheit den Facettenreflektor einmal abscannt, wird die Lichtverteilung einmal aufgebaut. Da der Galvanometer den Facettenreflektor zwei Mal in einer Periode abfährt, ist seine Ablenkfrequenz um den Faktor zwei kleiner als die Bildwiederholungsrate.

3.2 Aufbau

Der Aufbau besteht aus vier Baugruppen, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Diese sind die Lichtquelle, der Beleuchtungspfad, der Galvanometer und der Facettenreflektor.

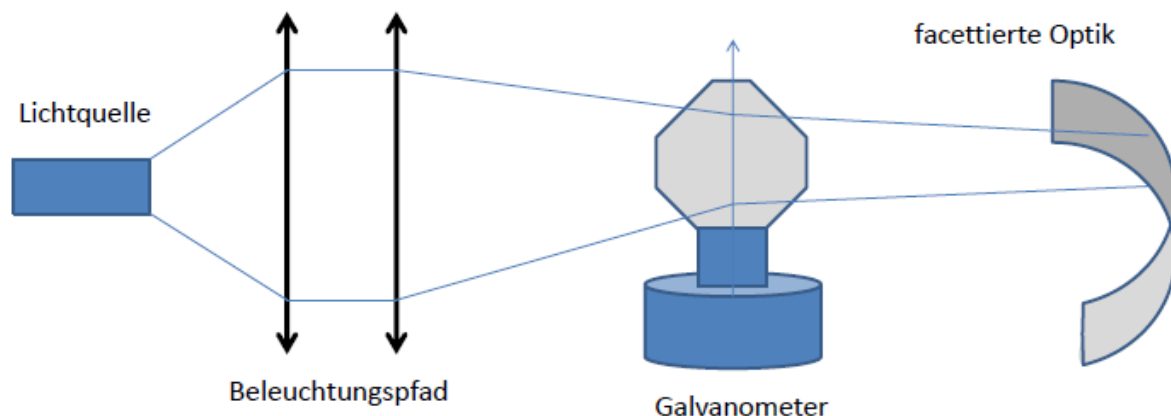


Abbildung 3: Aufbau bestehend aus einer Lichtquelle, dem Beleuchtungspfad, einem Galvanometer und einem Facettenreflektor.

3.2.1 Facettenreflektor

Das Ziel des Aufbaus ist es, eine Lichtverteilung mit horizontalem Winkelbereich von $[-20, +20]$ Grad und vertikalen Winkelbereich von $[-5, +5]$ Grad zu generieren.

Aus Bauraumvorgaben, Produktionsvoraussetzungen und Design wird eine erste Vorstellung von der Geometrie des Facettenreflektors abgeleitet. Die Länge soll 100 mm und die Höhe 1 mm betragen.

Generell gibt es die Möglichkeiten, das optische Element reflektiv mit einem Spiegel oder transmittiv mit einer Linse auszulegen. Daneben kann die Oberfläche kontinuierlich oder facettiert sein. In dem System wird ein facettierter Reflektor verwendet. Gründe sind zum einen die Erfahrung mit der Auslegung facettierter Reflektoren, zum anderen die Herstellungsmöglichkeiten von Reflektoren und das Fehlen chromatischer Effekte im Vergleich zu transmittiven Optiken.

Der Facettenreflektor hat zwei Aufgaben, zum einen die Umverteilung des Lichtes und zum anderen die Anpassung des Ausleuchtbereiches oder Raumwinkels. Das Licht muss umverteilt werden, da aus der Linie eine Fläche generiert werden soll. Die Umverteilung erfolgt durch Verkippung der Facetten. Um die Anpassung des Ausleuchtbereiches zu verstehen, muss der Winkel betrachtet werden, den die Lichtquelle samt Beleuchtungspfad mit einer Facette aufspannt, siehe Abbildung 4.

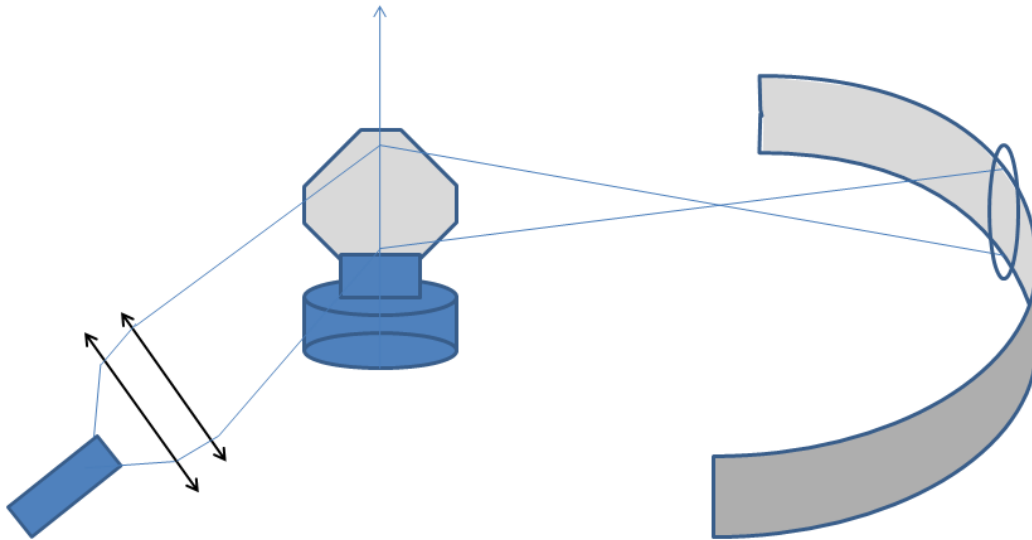


Abbildung 4: Raumwinkel, den der Laser samt Beleuchtungspfad aufspannt und der auf den Facettenreflektor trifft.

Integriert man über alle Winkel, resultiert die gesamte Lichtverteilung. Um den Ausleuchtbereich eines Pixels zu erhalten, passt der Facettenreflektor den Ausleuchtbereich durch gekrümmte Oberflächen an.

Das *Macro Focal Reflector* Modul in *LightTools* ist ein Werkzeug, um einen Facettenreflektor zu designen. Aus

- Lage der Lichtquelle,
- Anzahl der Facetten in horizontaler und vertikaler Richtung,
- Größe der Facetten in horizontaler und vertikaler Richtung,
- dem rechteckigen Ausleuchtbereich jeder Facette
- und der Krümmung

berechnet das Tool den Reflektor. Im Folgenden werden die oben genannten Einstellungen Schritt für Schritt beschrieben.

Das Programm berechnet den Facettenreflektor ausgehend von einer Punktlichtquelle. Das heißt für das Design des Reflektors muss der Lichtschwerpunkt gefunden werden. Der Galvanometer verschiebt beim Scannen die virtuelle Position der Lichtquelle entsprechend Abbildung 5. Damit wandert auch der Lichtschwerpunkt. Eine Approximation an den Lichtschwerpunkt stellt der Galvanometer dar, da sich an der Stelle alle Strahlbündel schneiden. Deswegen scheint es sinnvoll, die Punktlichtquelle an die Stelle des Galvanometers zu legen.

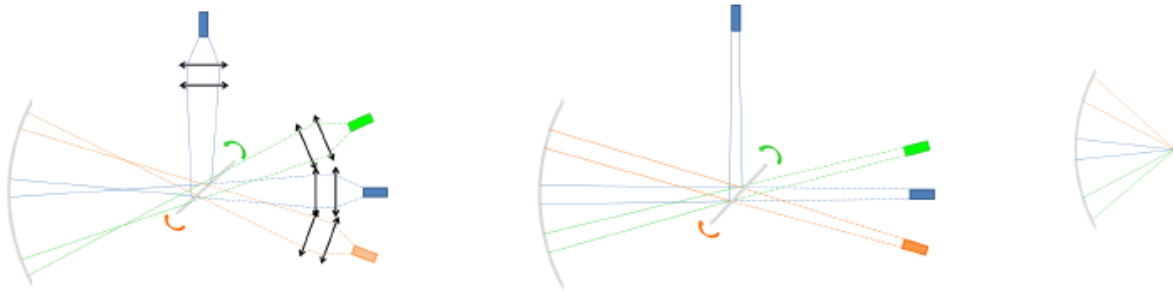


Abbildung 5: Links und in der Mitte sind zwei Beispiele für die scheinbare Verschiebung der Lichtquelle gezeigt. Das Tool berechnet den Reflektor nach der Lichtquelle rechts.

Der Galvanometer wird mit 100 Facetten in einer Zeile designt. Eine Facette soll eine Kantenlänge von 1 mm haben.

Immer vier Facetten werden zusammengefasst und leuchten eine Spalte aus, siehe Abbildung 6. Der Ausleuchtbereich einer Facette beträgt so 0,8 auf 2,5 Grad. Entscheidend ist dabei eine scharfe Abbildung der einzelnen Facetten. Dies ermöglicht, in Kombination mit Ablenkeinheit, Beleuchtungspfad und Lichtquelle, eine gezielte Anpassung der Lichtverteilung.

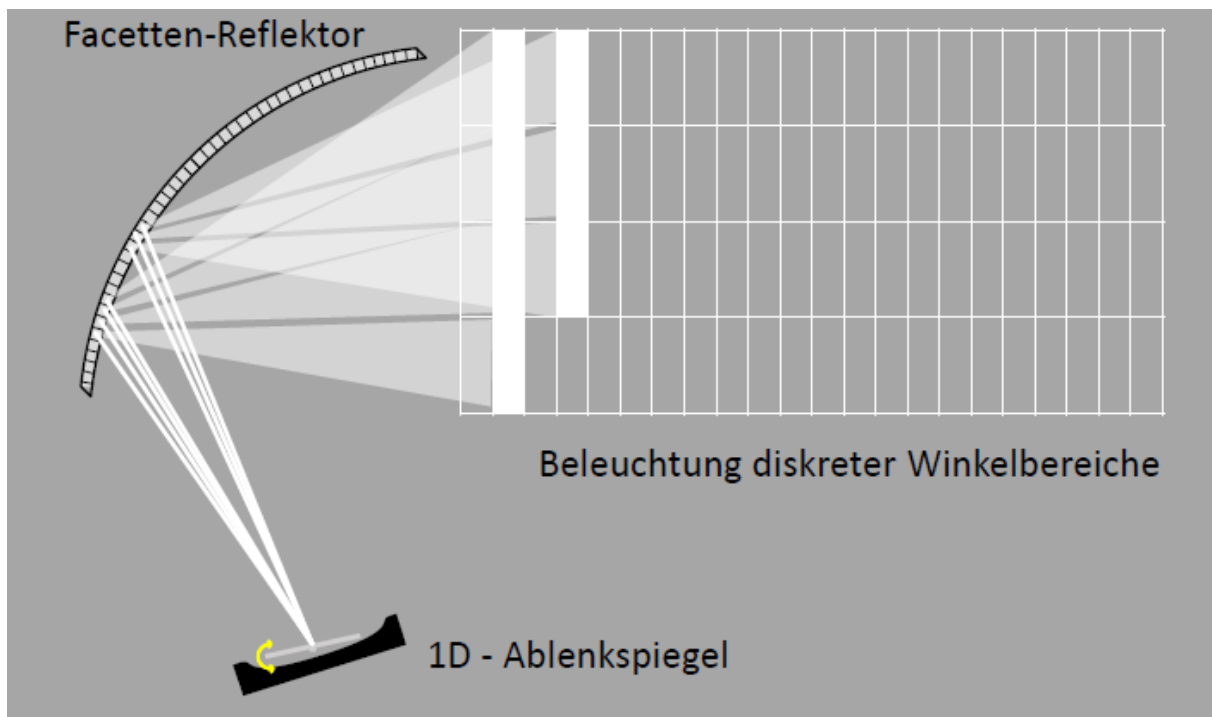


Abbildung 6: Ausleuchtbereich des Facettenreflektors.

Weiterhin gibt es die Möglichkeit, den Facettenreflektor gekrümmt oder gerade auszulegen, das heißt Strahlen nach dem Facettenreflektor konvergieren oder divergieren zu lassen. Konvergierende Strahlen führen zu einem gekrümmten Reflektor, dessen Form sich einer Kreisbahn um den Galvanometer annähert, siehe Abbildung 7. Eine Kreisbahn ist geschickter als eine lineare Anordnung, da die Weglänge von Ablenkeinheit zu Facettenreflektor für jeden Strahl gleich ist. So wäre bei der Anpassung des Strahls der Strahldurchmesser auf dem Facettenreflektor immer gleich. Außerdem sind beim Abfahren einer Kreisbahn die lineare Geschwindigkeit auf dem Kreisbogen und die Winkelgeschwindigkeit proportional.



Abbildung 7: Krümmung des Facettenreflektors. Je nach Gestaltung des Facettenreflektors verlassen entweder konvergierende Strahlenbündel (Abbildung links) oder divergierende Strahlenbündel (Abbildung rechts) die Anordnung [7].

3.2.2 Galvanometer

Ein Galvanometer ist ein Spiegel, der sich spannungsgesteuert um seine Achse drehen kann. Die Bewegung wird durch einen Elektromotor mit einer Rückstellfeder ausgeführt. An zwei Umkehrpunkten wird die Bewegung unterbrochen. Der Weg zwischen den Umkehrpunkten kann durch die Spannung angepasst werden, das heißt zum Beispiel sinus- oder dreieckförmig sein, wobei die mechanische Trägheit berücksichtigt werden muss. Ein Spannungswert gibt kontinuierliche Rückmeldung über die Winkelposition. Dies ist von Vorteil für die Lasermodulation, da einem Winkelintervall Facetten zugeordnet sind. Durch die Rückmeldung der Position ist eine genaue Ansteuerung möglich.

Eine Alternative zum Galvanometer stellt ein Polygonrad dar. Da es sich hier um eine kontinuierliche Bewegung handelt, können die Ablenkgeschwindigkeiten höher sein und die Winkelgeschwindigkeit ist konstant.

3.2.3 Beleuchtungspfad

Die Aufgabe des Beleuchtungspfades ist die Abbildung des Laserstrahls auf den Facettenreflektor. Die Höhe des Spots kann aus der Geometrie des Facettenreflektors entnommen werden, sie beträgt 1 mm. Die Breite des Spots soll möglichst gering sein, dass bei einem Übergang von einer zur nächsten Facette beide Facetten für eine möglichst kurze Zeit gleichzeitig beleuchtet werden, vergleiche Abbildung 8. Je ausgedehnter der Spot, desto länger werden beide gleichzeitig beleuchtet. Soll nun eine Facette beleuchtet werden, die andere aber nicht, bestimmt dies den Kontrast in der resultierenden Lichtverteilung. Neben der Größe des Spots sind Form und Füllung relevant.

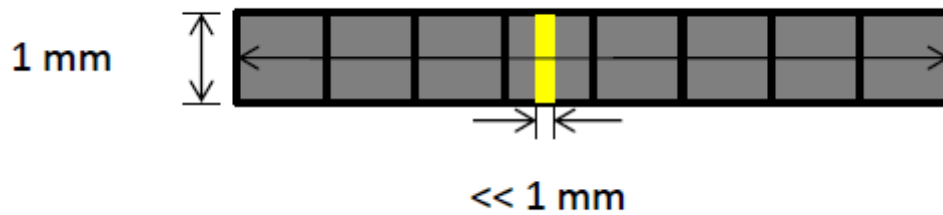


Abbildung 8: Anforderungen an den Beleuchtungspfad.

Im Abschnitt Facettenreflektor wird die Punktlichtquelle an die Stelle des Galvanometers gesetzt. Nun muss der Winkel, den der Strahl aufspannt, an die Punktlichtquelle angepasst werden. Anpassung von Größe des Spots und aufgespanntem Winkel erfolgt mit einem System aus Linsen. Dabei kommt Fokussieren und Parallelisieren in Betracht.

Laserstrahlen lassen sich als Gauß-Strahlen beschreiben. Ein wesentliches Merkmal von Gauß-Strahlen ist die ausgedehnte Strahltaile. Wird die Strahltaile mit dem Divergenzwinkel multipliziert, resultiert das Beam-Parameter-Produkt. Das Beam-Parameter-Produkt bleibt unter Anwendung optischer Elemente für den Strahl konstant und sagt etwas über die Strahlqualität aus. Je kleiner es ist, desto besser ist ein Strahl fokussierbar. Das Beam-Parameter-Produkt leitet sich aus der Étendue ab, vergleiche [8], [9].

Fokussieren bedeutet demnach die Strahltaile in einer bestimmten Entfernung zu minimieren. Beim Parallelisieren wird der Divergenzwinkel minimiert, indem der Fokus ins Unendliche gesetzt wird. Durch Betrachtung des Aufbaus, die an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt wird, kann eine Anforderung an die Strahlqualität abgeleitet werden, für die Fälle, dass auf den Galvanometer fokussiert wird, dass auf den Facettenreflektor fokussiert wird, und dass das Licht parallelisiert wird. Je näher am Galvanometer fokussiert wird, desto größer die Anforderungen an die Strahlqualität aber desto besser ähnelt der aufgespannte Winkel dem der Punktlichtquelle.

Form und Homogenität können mit verschiedenen Elementen angepasst werden. Ein Mikrolinsenarray (MLA) besteht aus vielen rechteckigen Linsenpaaren. Die Linsenpaare unterteilen das einfallende Licht in einzelne rechtwinklige Teile. Durch eine Überlagerung wird die Füllung homogenisiert. Eine Blende kann ebenfalls einen rechteckigen Spot formen, allerdings hat die Blende keine homogenisierende Wirkung und bringt Verluste, da sie Bereiche der Verteilung abschattet.

3.2.4 Lichtquelle

Die Anforderungen des Beleuchtungspfades an die Strahlqualität setzen eine Laserlichtquelle voraus. Für die Anwendung kommen zwei Techniken in Betracht: Eine Glasfaser, die mit Diodenlasern gespeist wird oder ein Dioden-Freistrahl-Laser. Beide erzeugen weißes Licht, indem die Farben rot, grün und blau gemischt werden. Die Strahlqualität wird mit dem Beam-Parameter-Produkt beschrieben. Hier ist der Freistrahl-Laser besser als die Glasfaser. Mehr Leistung ist bei der Glasfaser verfügbar, allerdings sind für hohe Leistungen Multimode-Fasern mit hohem Durchmesser nötig, die eine schlechtere Strahlqualität haben. Bei Freistrahl-Lasern werden die einzelnen Strahlen mit dichroitischen Spiegeln überlagert, was anfällig gegen Winkelfehler ist. Bei einer Glasfaser wird Licht durch Totalreflexion in der Faser gemischt. Daher gibt es bei Glasfasern weniger Farbrichtungsfehler. Bei der Glasfaser kann das eigentliche Lasermodul an einer Stelle abseits des Scheinwerfers platziert werden. Ein Kühlkörper hat somit ausreichend Platz. Beim Freistrahl-Laser muss der Kühlkörper im Bauraum des Scheinwerfers untergebracht werden.

4 Bewertung des Systems

Das Prinzip mit einer eindimensionalen Ablenkeinheit und einer Lichtaustrittsfläche hat das Potential einer einfacheren Montage und höherer Stabilität im Betrieb im Vergleich zu anderen scannenden Systemen. Die Reduktion der Komplexität geht auf Kosten der Auflösung. Die Lichtverteilung ist nun pixeliert.

Die Auslegung des Facettenreflektors muss im Simulationstool für eine Punktlichtquelle erfolgen, daher ist das Design als eine Mittelung für alle Winkelpositionen des Galvanometers zu sehen und der Reflektor kann nicht direkt auf den vorliegenden Beleuchtungspfad mit Ablenkspiegel angepasst werden. Der Beleuchtungspfad nähert die Punktlichtquelle allerdings, nach ersten Simulationsergebnissen zu urteilen, ausreichend an. Als Lichtquelle kommen ein RGB-Freistrahllaser oder ein fasergekoppelter Laser in Frage, die sich in Lichtqualität und Farbmischung unterscheiden.

4.1 Simulation

Die Abbildungen 9, 10 und 11 zeigen die Simulation einer Testlichtverteilung, ähnlich einem Ablendlicht, mit dem Facettenreflektor. In Abbildung 9 ist der Aufbau gezeigt. Eine rechteckige Lichtquelle stellt Galvanometer, Beleuchtungspfad und Laser dar. Der Facettenreflektor wird vollständig beleuchtet, so wird die Beleuchtung über eine Scanperiode approximiert. In den Abbildungen 10 und 11 sind die simulierten Intensitätsverteilungen dargestellt. Die dargestellten Simulationen unterscheiden sich durch die Kantenlänge der verwendeten Lichtquelle und veranschaulichen so die Auswirkungen des Beleuchtungspfades auf die Lichtverteilung.

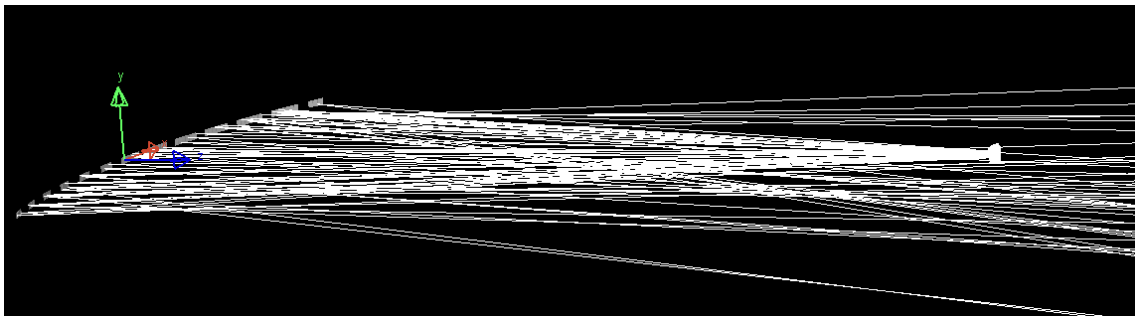


Abbildung 9: Aufbau zur Generierung der Testverteilung.

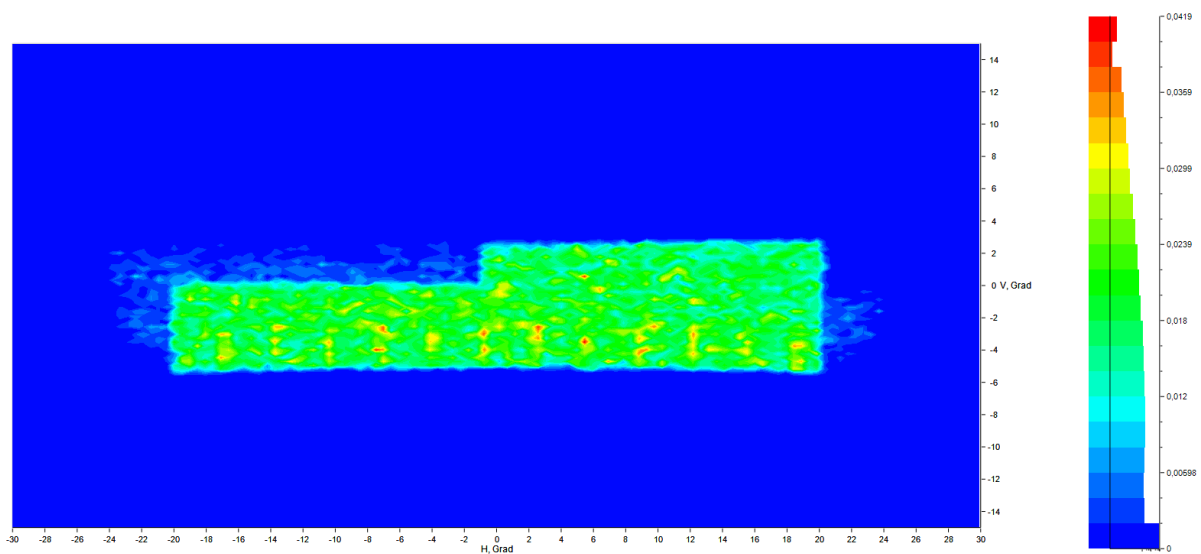


Abbildung 10: Lichtstärkeverteilung des Aufbaus in Abbildung 9. Die Lichtquelle hat eine Kantenlänge von 1 mm.

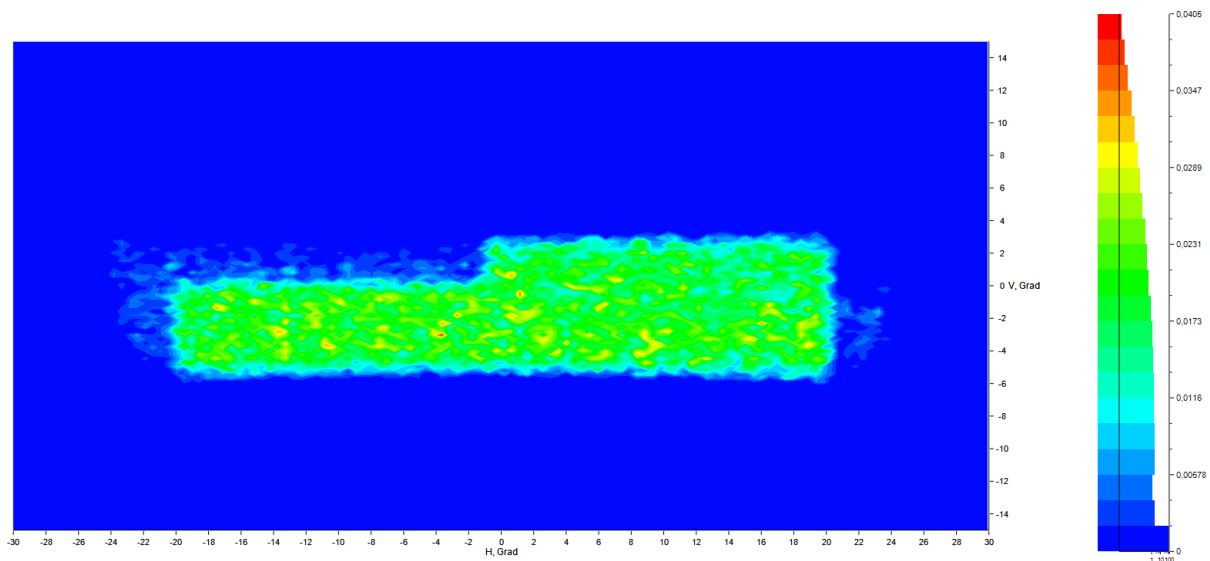


Abbildung 11: Lichtstärkeverteilung des Aufbaus in Abbildung 9. Die Lichtquelle hat eine Kantenlänge von 3 mm.

Die Abbildungen zeigen die Testlichtverteilung als Lichtstärkeverteilung. Bei einer Lichtquelle mit einer Kantenlänge von 1 mm ist die Abbildung schärfer als bei einer Lichtquelle mit einer Kantenlänge von 3 mm.

Das Ergebnis zeigt, dass der von der Lichtquelle und dem Beleuchtungspfad aufgespannte Winkel einen Einfluss auf die Schärfe der Abbildung hat.

5 Ausblick

Die Auslegung des Reflektors ist erfolgt und wird unter Berücksichtigung verschiedener Lichtquellen und Beleuchtungspfade validiert. Die Überprüfung erfolgt zuerst simulativ und dient auch der Prüfung verschiedener mechanischer Varianten. Ziel ist es, die beschriebenen Bauelemente so anzuordnen, dass mechanische und optische Eigenschaften optimiert werden. Die Variante, die in der Simulation gute Ergebnisse zeigt, soll in Zukunft in einem Laboraufbau realisiert werden. Dazu ist in erster Linie die Fertigung des designten Facettenreflektors in ausreichender Präzision und Oberflächenqualität erforderlich. Die experimentelle Überprüfung wird zeigen, ob der realisierte Reflektor den Anforderungen genügt und inwieweit die Ergebnisse der Simulation erreicht werden. Der Laboraufbau bietet weiterhin die Möglichkeit den Beleuchtungspfad und den Galvanometerscanner anzupassen. Als folgender Schritt wird eine Laseransteuerung realisiert, um durch Modulation der Lichtquelle die resultierende Lichtverteilung zu verändern. Anschließende Messungen des Auflösungsvermögens und des Kontrasts schließen die Validierung des Gesamtsystems ab.

6 Literatur

- [1] Carsten Gut, Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme, Dissertation, 2018.
- [2] Rainer Kauschke, Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern, Dissertation, 2006.
- [3] Mirco Götz und Karsten Eichhorn, "Optical Technologies for Future Headlamps", In: International Symposium on Automotive Lightning – ISAL 2005 – Proceedings of the Conference, Herbert Utz Verlag, 2005.
- [4] Steffen Strauß, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung, Dissertation, 2007.
- [5] Joscha Roth, Untersuchung von elektrodynamischen Mikroscoannern zur Darstellung von Lichtsymbolen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung, Dissertation, 2016.
- [6] Jürgen Hager, Oliver E. Woisetschläger, "iLaS - Laserbasierte Hochluminanz-Lichtquelle mit dynamischer Leuchtdichteverteilung für adaptive Scheinwerfer-Systeme", Schlussbericht, 2018, Hrsg. von Osram GmbH
- [7] LightTools, Advanced Design Module User's Guide, 2018.
- [8] J. Chaves, Introduction to Nonimaging Optics, Optical Science and Engineering, CRC Press, 2008, ISBN: 9781420054323.
- [9] Dietrich Gall, Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium, Pflaum, 2004.