

Lichtquellenmodulation mit Lichtmischstäben

Simon Wendel^a, André Domhardt^a, Udo Rohlfing^b, Uli Lemmer^a,

^a Light Technology Institute, University of Karlsruhe (TH),

Engesserstr. 13, D-76131 Karlsruhe

^b Dept. of Mathematics and Natural Sciences, University of Applied Sciences Darmstadt,

Schoefferstr. 3, D-64295 Darmstadt

ABSTRACT

Lichtmisch- und leitstäbe (LMR bzw. LGR) basieren auf mehrfacher Totalreflexion(TIR) und bieten einige sehr wertvolle Designmöglichkeiten. Mit ihnen ist es möglich, nahezu beliebige Lichtverteilungen zu erzeugen. Insbesondere im Zusammenhang mit LEDs können sie äußerst effektiv eingesetzt werden, denn sie sind in der Lage, den gesamten Lichtstrom der LED zu nutzen und durch die theoretisch verlustfreie TIR mit hoher Effizienz zu arbeiten. Zu den häufigsten Anwendungen der LMR gehört dabei neben der Farbmischung die Erzeugung von homogenen Leuchtdichteverteilungen an der Lichtaustrittsfläche. Dennoch werden im üblichen Gebrauch die Möglichkeiten der LMR nicht vollständig genutzt. Daher demonstrieren wir eine neue Herangehensweise an das Design von LGR, die ihre Leistungsfähigkeit erhöht und für Beleuchtungsaufgaben anwendbar ist.

1. EINLEITUNG

Durch die zunehmend bessere Leistungsfähigkeit der festkörperbasierten Lichtquellen und der wachsenden Anzahl an unterschiedlichen Anwendungen befindet sich die LED-Beleuchtungstechnik in einer Phase des Fortschritts und der Entwicklung. Einige der Eigenschaften, durch die sich die LEDs auszeichnen und von anderen Lichtquellen unterscheiden, machen sie zu hervorragenden Kandidaten für anspruchsvolle Beleuchtungsaufgaben.

Betrachtet man die LED aus der Sicht eines Optik Designers, dann bestehen diese Eigenschaften in erster Linie aus der kleinen Dimension der Licht emittierenden Fläche, also des LED Chips, sowie dem begrenzten Abstrahlwinkel. Letzteres ermöglicht es den Lichtmischstäben(LMR) und den Lichtleitstäben(LGR), das gesamte, von der LED abgestrahlte, Licht zu erfassen. Durch dieses Zusammenspiel eignet sich die Kombination aus LEDs und den Lichtstäben besonders gut, um neue Beleuchtungssysteme kleiner Dimension und hoher Effizienz zu entwickeln. Unter LMR werden im Folgenden optische Bauteile verstanden, bei denen die räumliche Durchmischung des Lichts innerhalb des Stabes ein wesentlicher Bestandteil ist, während das Licht bei den LGR eher entlang bestimmter Pfade geführt wird.

Mithilfe von LMRs kann das von einer Quelle ausgehende Licht derart modifiziert werden, dass eine gleichförmige Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte oder Lichtstärke erzeugt wird. Ihre Funktionsweise ist des Weiteren wenig sensitiv bezüglich Änderungen von Parametern, die die Lichteinkopplung betreffen. Beispielsweise die Positionierung der Lichtquellen vor dem Stabeingang oder Inhomogenitäten in LED Arrays haben vergleichbar geringen Einfluss auf die Lichtverteilung am Ausgang des LMRs. Eine weitere wichtige Anwendungsmöglichkeit der LMRs ist die Mischung des Lichts verschiedenfarbiger LEDs mit dem Ziel, eine gleichförmige Beleuchtung einer gewünschten Farbe zu erzeugen.

Es wurden in den letzten Jahren bereits zahlreiche Artikel über Verbesserungen und Weiterentwicklungen von LMR veröffentlicht, die vor allem die Gleichförmigkeit der Beleuchtungsstärke an der Austrittsfläche und die Farbmischung betrafen. Die meisten dieser Ansätze schienen mehr oder weniger heuristischer Natur gewesen zu sein. Die tatsächlichen Möglichkeiten des Optik Designers, das Licht in einer gewünschten Weise zu lenken, sind dabei aber noch sehr begrenzt. Insgesamt entsteht der Eindruck, dass das Erreichen einer bestimmten Lichtverteilung mit LMRs zu einem gewissen Teil nur nach Faustregeln vorgenommen werden kann.

Daher möchten wir in diesem Artikel eine andere Herangehensweise an das Design von LGR vorstellen. Dabei steht vor allem eine wesentlich erhöhte Kontrolle über die Verteilung des aus dem LGR austretenden Lichts im Vordergrund. Wir werden dabei weißes oder monochromatisches Licht verwenden und keine Farbmischung betrachten. Des Weiteren

gehen an den meisten Stellen von Punktlichtquellen aus, denn das ermöglicht eine bessere Darstellung der zugrunde liegenden Prinzipien.

Zunächst stellen wir das Funktionsprinzip der üblichen LMRs vor. Als nächstes erarbeiten wir eine systematische Vorgehensweise für den Designprozess von LGRs, der auf Maßschneideralgorithmen beruht und auf verschiedene Art und Weise angewendet werden kann. Zuletzt demonstrieren wir den praktischen Einsatz der vorgestellten Methoden anhand der beispielhaften Konzeption eines Linienlichts.

2. AKTUELLER STAND DES DESIGNS VON LICHTMISCHSTÄBEN

Das Ziel vieler anspruchsvoller Beleuchtungsaufgaben ist das Design eines optischen Systems, das neben einer konstanten Beleuchtungsstärke, Intensität oder Leuchtdichte gleichzeitig dazu in der Lage ist, ein Maximum an Effizienz zu liefern. Für diese Kombination sind LMRs ein adäquates Werkzeug.

Üblicherweise ist der Lichtstrom, der von einer Quelle in über die Eintrittsfläche in den LMR eingekoppelt wird, nicht gleichförmig verteilt. Diese Verteilung ändert sich nun entlang des Stabes und weist nach der Austrittsfläche eine wesentlich verbesserte Gleichförmigkeit in der räumlichen bzw. winkelbezogenen Verteilung auf. Da LGRs aus dielektrischem, transparentem Vollmaterial bestehen, findet die Lichtpropagation im Inneren des Stabes mittels nahezu verlustfreier Totalreflexion (TIR) statt. Daher eignen sie sich sehr gut für die oben genannten Zwecke. Bei den gängigen massiven LMR sind die Eintritts- und Austrittsfläche eben. Eine alternative Möglichkeit, LMR umzusetzen, ist die Verwendung von Hohlkörpern mit einer Lichteintritts- sowie einer Lichtaustrittsöffnung. Hier übernehmen spiegelnde Innenflächen die Aufgabe der TIR und gewährleisten so die Lichtpropagation entlang des Stabes.

In dieser Arbeit setzen wir die Materialien als ideal transmittierend voraus und vernachlässigen Absorptionsprozesse.

2.1 Gerade Lichtmischstäbe

Es gibt eine Reihe von geraden LMRs unterschiedlichen Querschnitts, die bereits ausführlich untersucht wurden und die gute Ergebnisse erzielen. Dazu gehören runde, rechteckige oder hexagonale LMR [2]. Sie werden meist angewandt, wenn, wie beispielsweise in einen Projektor, eine Fläche konstanter Leuchtdichte erwünscht ist, um eine möglichst gute Abbildung zu erreichen.

Grundsätzlich verwenden gerade LMR mehrfache TIR, was zu einer räumlichen Durchmischung des Lichts an der Austrittsfläche führt. Dieses einfache Prinzip wird in Abbildung 1 dargestellt.

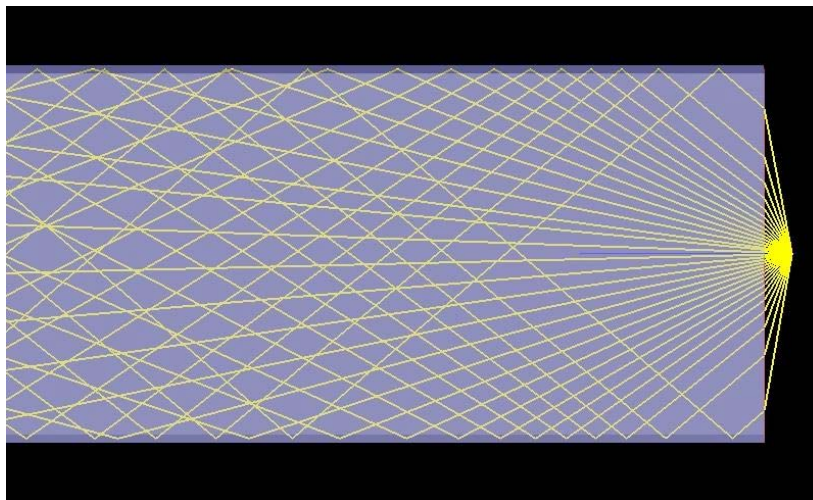


Abb. 1 : Querschnittsdarstellung des Strahlverlaufs bei einem geraden LMR

Eine Verlängerung des LMR bei gleichbleibendem Durchmesser bewirkt eine zunehmende Gleichförmigkeit der Leuchtdichte an der Austrittsfläche. Dementsprechend gehört zu einer gewünschten Mindestgleichförmigkeit auch eine entsprechende Mindestlänge. Diese Länge hängt unter anderem von der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle und der Form des Querschnitts des LMRs ab. So benötigt beispielsweise eine Quelle, die nur in einem schmalen Winkelbereich abstrahlt, deutlich längere LMRs als beispielsweise ein Lambertischer Emittor.

Begründet durch die Natur ihrer Wirkungsweise, sind LMRs deutlich weniger sensitiv gegenüber räumlichen Verschiebungen des eingekoppelten Lichts als das etwa bei linsenbasierten Systemen der Fall ist. Bei einer ausreichenden Länge des LMR spielt die genaue Position der Quelle an der Eintrittsfläche nahezu keine Rolle mehr. Damit ist es möglich, mehrere Quellen einzukoppeln deren Lichtverteilung sich an der Austrittsfläche nicht nennenswert unterscheidet. Diese Tatsache kann beispielsweise genutzt werden, um LED Farbmischung zu realisieren.

2.2 Abgeschrägte Lichtmischstäbe

Eine gebräuchliche Erweiterung der geraden LMRs sind die abgeschrägten Lichtmischstäbe, bei denen man das Verhältnis zwischen der Lichteintritts- und Lichtaustrittsfläche verändert. Die Form des Querschnitts bleibt dabei entlang des Stabes gleich.

Durch die Verkippung der Seitenwände findet eine Veränderung der Winkelverteilung der Strahlen statt. Diese Änderung hängt offensichtlich stark vom Verkippungswinkel ab. In Abb. 2 ist die Funktionsweise der abgeschrägten Lichtmischstäbe in Form des Strahlverlaufs entlang eines Querschnitts dargestellt.

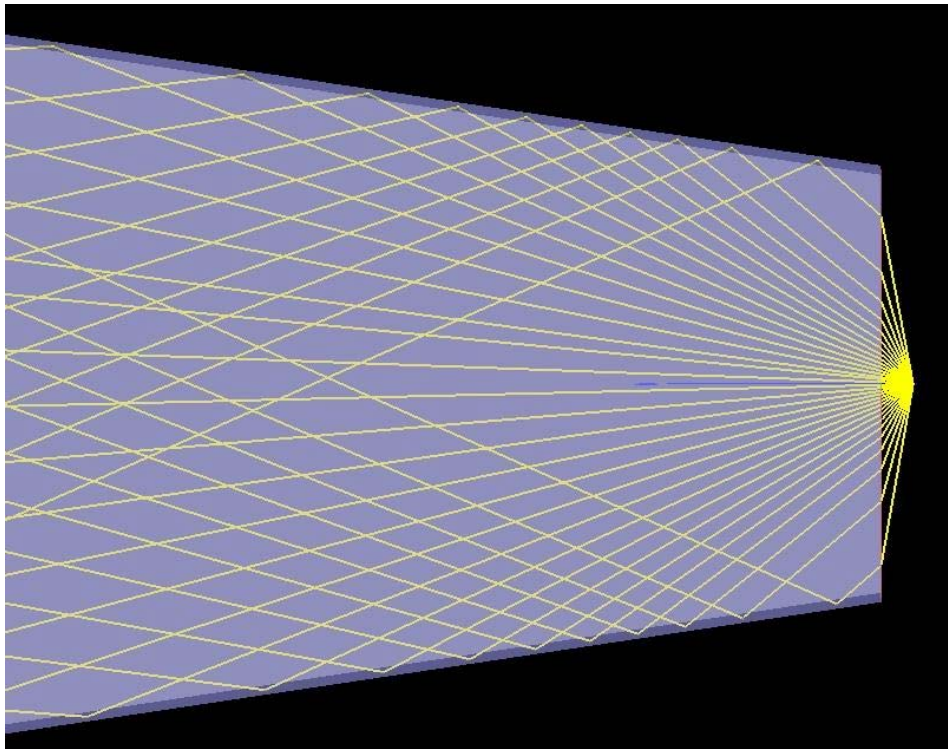


Abb. 2 : Querschnittsdarstellung der Winkelveränderung bei abgeschrägten LMR

Abgesehen von der Änderung der Winkelverteilung, erfährt das Licht die gleiche räumliche Homogenisierung wie bei geraden LMRs. Allerdings kann man aus Abb.2 auch erkennen, dass durch die Verkippung der Seiten weniger Totalreflexionen pro Länge stattfinden und dadurch für das gleiche Maß an Durchmischung bei abgeschrägten Stäben größere Längen notwendig sind als bei geraden LMRs.

Zusammenfassend kann man sagen, dass abgeschrägte LMR in der Lage sind, sowohl eine gute Gleichförmigkeit zu bieten als auch den Austrittswinkel zu beeinflussen, etwa um ihn auf Kosten der Austrittsfläche zu reduzieren.

2.3 Lichtmischstäbe mit gewellten Oberflächen

Eine bereits gut untersuchte Möglichkeit die LMRs weiter zu modifizieren, ist die Verwendung von gewellten Oberflächen. Cassarly und Davenport haben in [1] den Einfluss verschieden gearteter Wellenstrukturen im Zusammenhang mit Lichtmischstäben unterschiedlichen Querschnitts überprüft. Dabei konnten sie eine vom Querschnitt abhängige Steigerung der Gleichförmigkeit des austretenden Lichts erreichen. Ein Beispiel für einen hexagonalen Lichtmischstab, bei dem die Oberfläche in Längsrichtung mit einer sinusartigen Wellenstruktur versehen wurde, zeigt Abb. 3. Es werden darin nur vergleichbar wenige Wellen mit entsprechend großer Amplitude verwendet, um eine gute Erkennbarkeit zu gewährleisten.

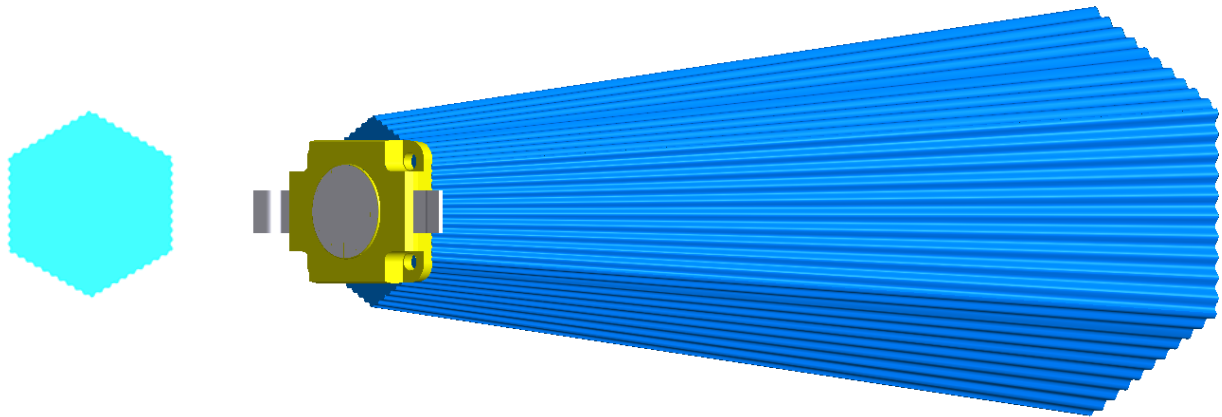


Abb. 3 : LMR mit gewellten Seitenflächen in Querschnittsansicht und perspektivischer Ansicht inklusive Golden Dragon LED an der Eintrittsfläche

Das Konzept der mit Wellen oder Facetten modulierten Oberflächen kann auf zahlreiche weitere LMR-Querschnitte angewandt werden. Allgemein kann man auch bei diesen Formen in verschiedenem Ausmaß eine Steigerung der Gleichförmigkeit erreichen und vor allem auch die Unabhängigkeit der Austrittsverteilung von der Quellposition am Eingang des LMR erhöhen. Als Resultat können durch die Verwendung von Wellen teilweise kürzere LMR schon ein zufriedenstellendes Ergebnis liefern.

3. MODIFIZIERUNG DER ABSTRAHLUNG VON PUNKTQUELLEN MIT MASSGESCHNEIDERTEN LICHTLEITSTÄBEN

Im letzten Kapitel wurde das Funktionsprinzip der üblichen Lichtmischstäbe vorgestellt. Ihre Vorteile liegen vor allem in der räumlichen Homogenisierung des austretenden Lichts. Es gibt allerdings Anwendungen, bei denen außerdem noch eine winkelbezogene Gleichförmigkeit gewünscht ist, dafür eignen sich die Standard Mischstäbe oft nicht in ausreichendem Maß. Beispiele dafür sind etwa virtuelle Displays, lithographische Prozesse oder spezielle Anforderungen aus der Allgemeinbeleuchtung.

Wenn die angestrebte Verteilung des austretenden Lichts in einer festgelegten Weise nicht-homogen sein soll, sind die üblichen LMRs ebenfalls ungeeignet. In diesem Kapitel möchten wir nun die Möglichkeiten des Optikdesigners zur Formung solcher Lichtverteilung erweitern. Eine Möglichkeit dafür ist der Einsatz von Optimierungsalgorithmen unter Verwendung von einem Stab-Startdesign und entsprechend gewählten Parametern und Randbedingungen. Wir werden hier allerdings einen anderen Weg gehen, indem wir die Anwendbarkeit von Maßschneider-Algorithmen im

Zusammenhang mit dem Design von LGRs untersuchen. Zur klareren Darstellung der Ergebnisse beschränken wir uns im Folgenden auf das Maßschneiden von Kurvenabschnitten, die die Ränder der LGR beschreiben und aus denen sich die zugehörigen Oberflächen durch Extrudieren gewinnen lassen.

Als erster Schritt bietet es sich zunächst an, die Lichteintrittsfläche der Vollmaterial-LGRs zu betrachten und an diesen Stellen nicht ebene Flächen einzusetzen. Dies ist darin begründet, dass die Lichteintrittsfläche bei den üblichen LMR deren einzige Fläche ist, bei der jedes beliebige, kleine Flächenelement nur von Lichtstrahlen aus einem entsprechend kleinen Winkelbereich getroffen wird, sofern die Quelle eine Punktquelle ist. Im Grenzfall eines infinitesimal kleinen Flächenelements gibt es nur noch genau einen Strahl aus der Quelle, der an dieser Stelle in den LGR eintritt. Diese Eindeutigkeit ist eine notwendige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Maßschneider Techniken. Sie benötigen dieses Kriterium, um einer Kurve oder Oberfläche eine eindeutige Form geben zu können, denn wenn beispielsweise zwei Strahlen an derselben Stelle unter unterschiedlichen Winkeln auftreffen, ist eine Umlenkung beider Strahlen in die gleiche Zielrichtung physikalisch nicht möglich. Da im Inneren der üblichen LMR die Strahlausbreitung in nicht sequentieller Form stattfindet, heißt das, dass hier die obige Eindeutigkeit im Allgemeinen auch für eine Punktquelle für die Innen- und Abschlussfläche des Stabes nicht gegeben ist [4].

Wir werden also im folgenden Abschnitt das Konzept des Maßschneiderns auf die Eintrittsfläche anwenden. Dabei verfolgen wir das Ziel, die Strahlen der Punktquelle in geeignete Bündel zu zerlegen und diese ohne Durchmischung so auf die Seitenflächen umzulenken, dass im Anschluss auch für die Seitenflächen des LGR die Maßschneideralgorithmen anwendbar werden.

3.1 Strahltrennung durch die Eintrittsfläche

Wie im vorigen Abschnitt motiviert, soll nun der erste Schritt in der Modifizierung der LGR Eintrittsfläche bestehen. Wir haben uns dabei für einen Vollmaterial Stab mit einem Brechungsindex von 1,5 entschieden. Außerdem sollen Mehrfachreflexionen vermieden werden, jeder Strahl soll also nach der Brechung beim Eintritt nur eine Totalreflexion an den Seitenwänden erfahren.

Die Verteilung des Strahlenbündels nach der Brechung ist ein erster Freiheitsgrad, den der Optik Designer wählen kann. Dadurch kann zum einen die Länge des Stabes beeinflusst werden. Zum anderen ist eine Anpassung an eine Lichtquelle mit einer anderen LVK möglich, ohne weitere Veränderungen am LGR vornehmen zu müssen. Dazu müssen lediglich die Eingabeparameter beim Maßschneiden angepasst werden.

Eine mögliche Wahl zeigt Abb. 4. Man kann erkennen, dass die, durch Maßschneiden berechnete, nicht ebene Eintrittsfläche die Lichtstrahlen so umlenkt, dass sie die ebene Seitenfläche des LGR dergestalt trifft, dass dort in einem gewissen Bereich für eine konstante Beleuchtungsstärke gesorgt wird. Außerdem zeigt Abb. 4, dass im Gegensatz zu herkömmlichen LMRs kein Licht ohne eine Totalreflexion durch den Stab gelangen kann.

Die beschriebene Vorgehensweise erlaubt es nun, die Seitenflächen des LGRs, die im ersten Maßschneiderschritt als Zielflächen gedient haben, im zweiten Maßschneiderschritt als Quellen zu verwenden. Das ist durch die erhaltene Eindeutigkeit des Strahlenweges möglich, was klar im Gegensatz zu den üblichen LMRs steht.

3.2 Maßschneiden der Seitenflächen zur Winkel-Flächen-Transformation

In diesem Absatz sollen nun die Seitenflächen des LGRs in longitudinaler Richtung designed werden. Einen Ansatz zur Beeinflussung des Lichtaustritts durch diese Fläche liefert Davenport in [3]. Darin werden verallgemeinerte parabolische Kurven (nicht rationale Beziér-Kurven zweiten Grades) eingesetzt und in einem gewissen Parameterraum variiert, um die Winkel-Flächen-Transformation zu verbessern.

Wie setzen zur Beschreibung der Seitenflächen ebenso wie schon für die Eintrittsflächen Freiform Kurven ein. Ihre genaue Form liefert eine zweite Anwendung des Maßschneiderns. Ein weiteres Mal eröffnen sich dem Optik Designer also Freiheitsgrade in der Gestaltung des LGR unter anderem durch die Wahl der Zielfunktion. Eine Möglichkeit ist es, eine konstante Beleuchtungsstärke auf der Lichtaustrittsfläche zu fordern. In Abb.5 sind die Querschnittsansicht und der Strahlenverlauf für diese Wahl gezeigt.

Eine wichtige Erkenntnis im Zusammenhang von der Verwendung von Maßschneiderflächen bei LGR ist, dass die räumliche Homogenität auf der Austrittsfläche durch Winkeldurchmischung der Strahlen entsteht. Das steht im Gegensatz zu LMR mit ebenen Seitenflächen, bei denen die Homogenität durch räumliche Durchmischung stattfindet.

Des Weiteren besteht durch die Freiform-Seitenflächen keine direkte Abhängigkeit mehr zwischen der Homogenität und der Länge des Stabes. Das kann für das Design von LGRs durchaus ein Vorteil sein.

Durch die weitgehend freie Wahl der Leuchtdichteverteilung an der Lichtaustrittsfläche, die sich durch die Verwendung des Maßschneiderns ergibt, eignen sich solche LGR für eine Fülle von möglichen Anwendungen wie Projektions-Systeme oder LED Abblendlicht von Scheinwerfern [4,5].

3.3 Maßschneidern der Stabaustrittsfläche

Nachdem das Licht an der Freiform Innenfläche des LGR eine Totalreflexion erfahren hat, verbleibt als letzter Design-Freiheitsgrad noch die Lichtaustrittsfläche. Auch sie kann maßgeschneidert werden, denn die Eindeutigkeit der Strahlen der Punktquelle wurde durch das zuvor beschriebene Vorgehen gewahrt. Damit eignen sich die Stab-Seitenflächen als Quelle für einen dritten Maßschneidervorgang. Die Zielverteilung kann innerhalb gewisser Grenzen frei gewählt werden. In dem in Abb. 6 gezeigten Beispiel haben wir uns für vollständig parallelisiertes Licht entschieden. Grundsätzlich kann aber neben Fernfeldverteilungen wie in unserem Beispiel genauso auch eine Beleuchtungsstärke auf einer bestimmten Detektorfläche durch das Maßschneidern der Endfläche erreicht werden.

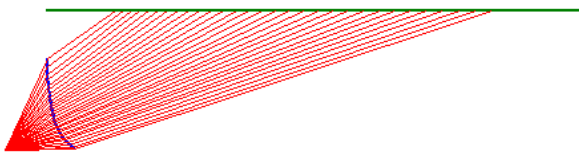


Abb. 4 : Beispiel für einen maßgeschneiderten Kurvenabschnitt der Lichteintrittsfläche

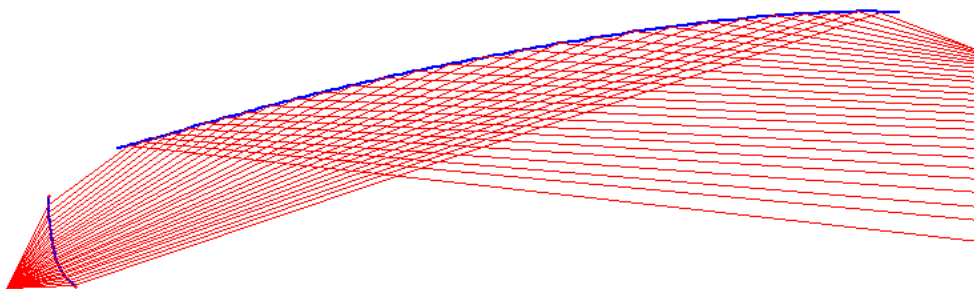


Abb. 5 : Beispiel für einen maßgeschneiderten Kurvenabschnitt der LGR Seitenwand

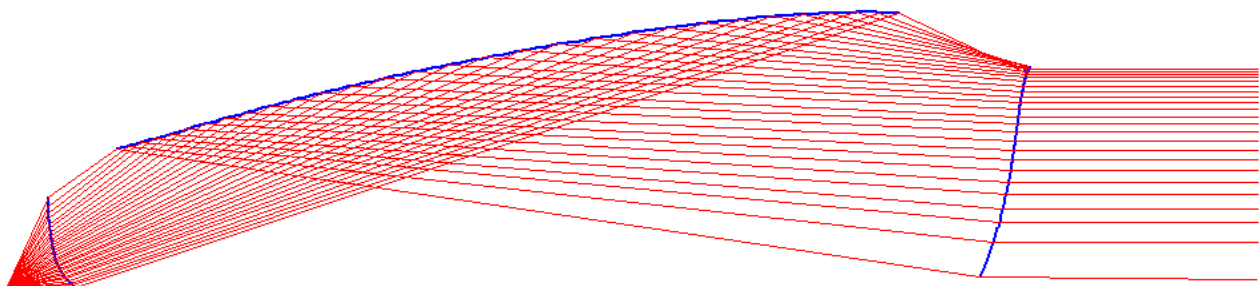


Abb. 6 : Beispiel für einen maßgeschneiderten Kurvenabschnitt der Lichtaustrittsfläche zur Erzeugung von parallelisiertem Licht

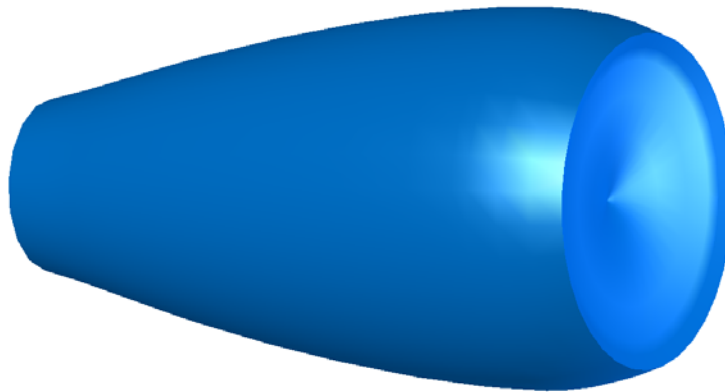


Abb. 7 : Beispiel für einen maßgeschneiderten, symmetrischen LGR
zur Erzeugung von parallelisiertem Licht (Perspektivansicht)

Zusammenfassend haben wir in den vorgestellten Schritten also die drei ebenen Fläche (Eintritts-, Seiten- und Abschlussfläche) handelsüblicher LMRs durch maßgeschneiderte Freiformflächen ersetzt und dadurch einen neuen Typus von LGRs geschaffen, mit denen neue Designs möglich sind. Das haben wir erreicht, indem wir zunächst die Lichteintrittsfläche zur Strahlentrennung eingesetzt haben. Mit der dadurch erhaltenen Eindeutigkeit der Strahlen konnte im Folgenden die Totalreflexion an den Seitenflächen genutzt werden, um eine wählbare Leuchtdichte an der Austrittsfläche zu generieren. Zuletzt konnte noch die Brechung beim Verlassen des LGR zur weiteren Beeinflussung der Lichtverteilung eingesetzt werden.

Aus den Kurvenabschnitten des Beispiels in den Abb. 4-6 entsteht der Vollmaterial LGR schließlich durch Einfügen von optisch nicht aktiven Kurvenabschnitten in den Zwischenräumen und einer Rotation der resultierenden Kurve um die Längsachse des Stabes. Eine perspektivische Ansicht des Ergebnisses zeigt Abb. 7.

3.4 Simulationen mit ausgedehnten Lichtquellen zur Verifikation

In den vorigen Abschnitten wurde ein LGR designed, der das Licht einer Lambertschen Punktquelle in einen parallelen Strahl transformieren soll. Das konnten wir durch Raytracing Simulationen verifizieren. Interessant ist nun im Hinblick auf reale Quellen aber auch, wie sich der LGR bei der Verwendung von ausgedehnten Strahlern verhält. Um das zu untersuchen, haben wir in den Simulationen die Punktquelle durch eine weiße Golden Dragon LED mit Lambertschem Strahlungsverhalten und einem Lichtstrom von 50 Lumen ersetzt. Da uns nur die Form der Verteilung interessiert, haben wir ideale und verlustlose Materialien angenommen und auf die Einbeziehung von Fresnel-Verlusten verzichtet.

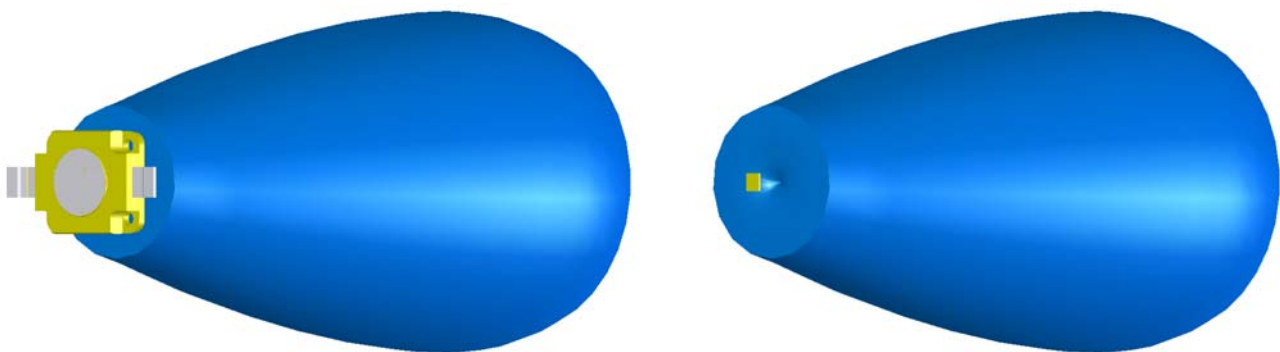


Abb. 8 : links : Golden Dragon LED vor dem LGR , rechts : 1x1mm² LED Chip vor dem LGR

Die Anordnung des optischen Systems zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse zeigt Abb.8. Der maximale Durchmesser des LGRs beträgt 19mm bei einer Länge von 38mm.

Aufgrund des sequenziellen Strahlverlaufs bei unserem Design erwarten wir eine hohe Sensitivität der Lichtaustrittsverteilung gegenüber Veränderungen der Position der Lichtquelle am Stabeingang. Daher haben wir eine Reihe von Simulationen mit veränderter LED Position durchgeführt und können unsere Erwartung bestätigen. Die Resultate zeigen die Lichtstärkeverteilungen in Abb. 9.

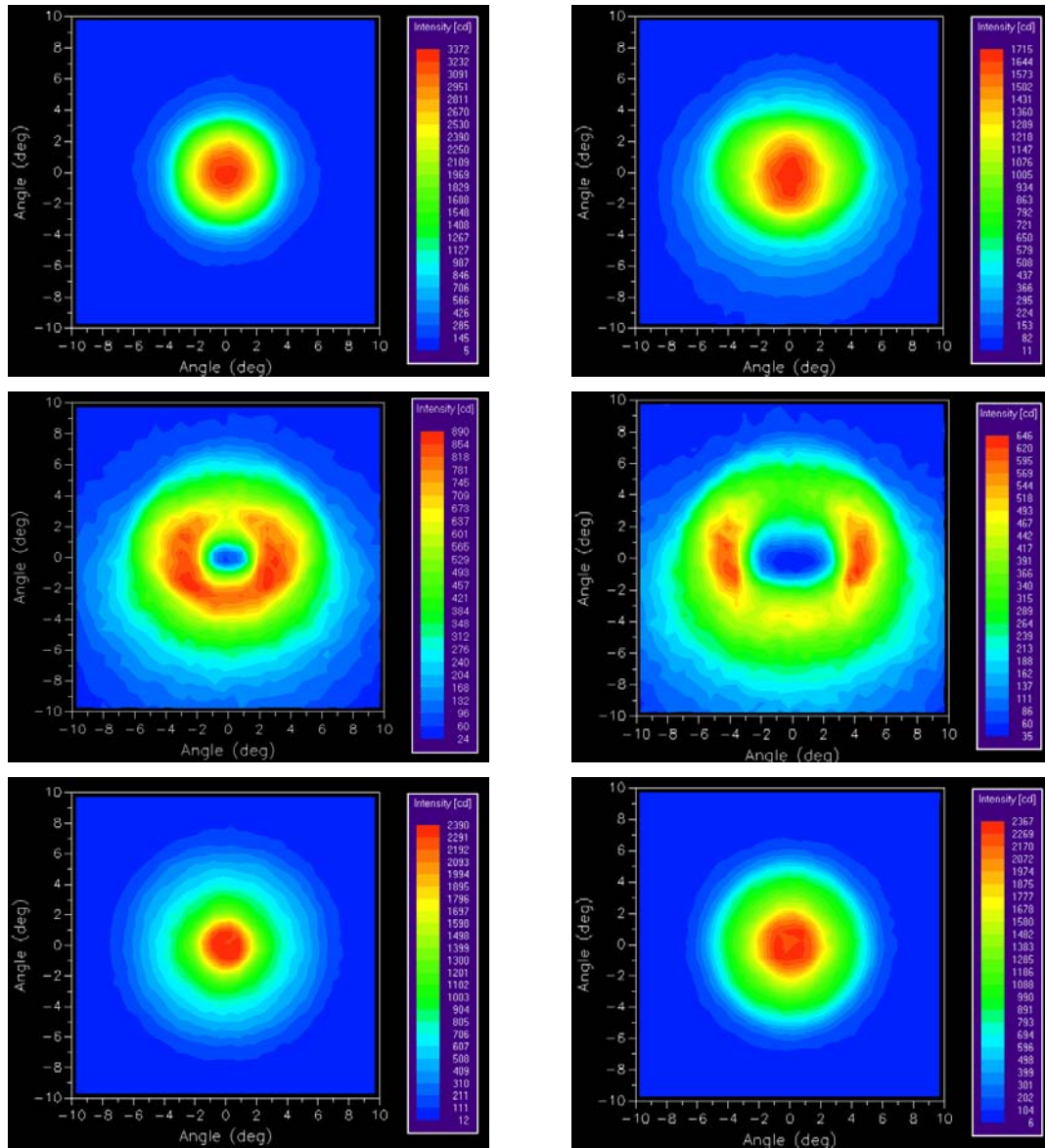


Abb. 9 : Lichtstärkeverteilungen im Fernfeld für verschiedene LED Positionen :

- a) Zentral
- b) Vertikale Verschiebung um 0,5 mm
- c) Vertikale Verschiebung um 0,75 mm
- d) Vertikale Verschiebung um 1,0 mm
- e) Axiale Verschiebung um + 0,5 mm
- f) Axiale Verschiebung um - 0,5 mm

In Abb. 9a) ist die Lichtstärkeverteilung für die zentral platzierte LED dargestellt. Die Abweichungen von einem ideal parallelisierten Strahl stammen von der Verwendung der nicht mehr punktförmigen Quelle und können mit einem Halbwertsinkel von $2,85^\circ$ beziffert werden.

Die Lichtstärken in den Abb. 9 b)-f) zeigen, dass eine Variation der LED Position um etwa die Hälfte ihres Durchmessers mit noch akzeptablen Veränderungen einhergeht. Größere Verschiebungen sorgen für starke Störungen in der Lichtstärkeverteilung.

4. LICHTMISCHSTÄBE ZUR ERZEUGUNG VON LINIENLICHT

Im folgenden Kapitel werden wir uns mit dem Design eines Lichtstabes beschäftigen, der die Erzeugung einer linienartigen Beleuchtungsstärkeverteilung mit einem hohen Aspektverhältnis zum Ziel hat. Als Lichtquelle dient in allen Simulationen ein ausgedehnter ($1 \times 1 \text{ mm}^2$) Lambertstrahler mit 50 Lumen.

4.1 Abgeschrägte LMR

Als ersten Ansatz untersuchen wir die Möglichkeiten, die ein handelsüblicher, abgeschrägter LMR zur Erzeugung des Linienlichts bietet. Dazu wird die Lichtquelle direkt vor die ebene Stabeintrittsfläche der Größe ($1 \times 1 \text{ mm}^2$) platziert. Bei einer festbleibenden Länge des LMRs von 10mm variieren wir nun den Neigungswinkel der Seitenflächen. Wir starten dabei mit einem geraden Stab und erhöhend das Aspektverhältnis der Austrittsfläche bei weiterhin ebenen Seiten- und Abschlussflächen. In Abb. 10 sind die Simulationsergebnisse für die Beleuchtungsstärke beispielhaft für drei unterschiedliche Austrittsflächen gezeigt ($1 \times 2 \text{ mm}^2$, $1 \times 4 \text{ mm}^2$, $1 \times 6 \text{ mm}^2$).

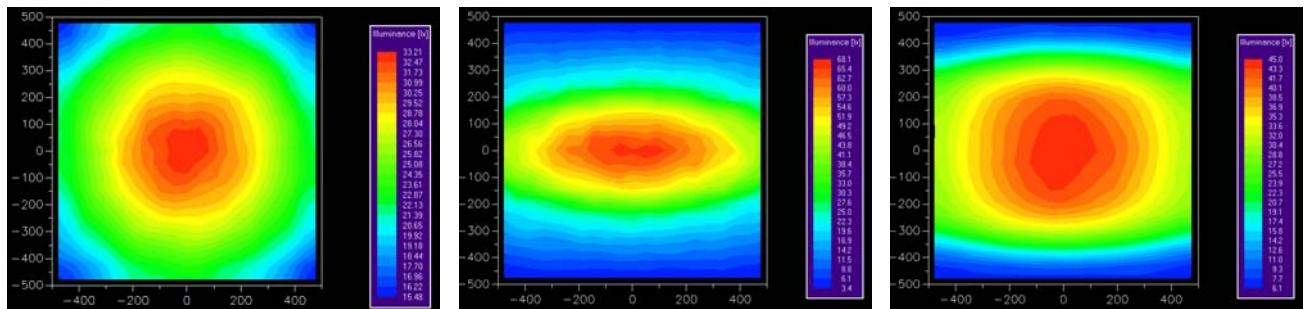


Abb. 10 : Beleuchtungsstärkeverteilungen auf einer Detektorfläche in 1000mm Entfernung für folgende Stabaustrittsflächen:

a) $1 \times 2 \text{ mm}^2$

b) $1 \times 4 \text{ mm}^2$

c) $1 \times 6 \text{ mm}^2$

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die beste Annäherung an ein Linienlicht mit einer ($1 \times 4 \text{ mm}^2$)-Austrittsfläche erreicht wird. Dennoch sieht man deutlich, dass durch die Verwendung abgeschrägter LMRs mit ebenen Flächen keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden konnte. Das Wechselspiel zwischen Kollimierungsrate und Aspektverhältnis verhindert bessere Ergebnisse.

Ein möglicher Ansatz zur Verbesserung der Performance des abgeschrägten Stabes ist es, eine durch Optimierung berechnete, nicht ebene Abschlussfläche einzusetzen. Um die Effizienz dieser Methode zu überprüfen, haben wir als Basis den LMR mit der ($1 \times 4 \text{ mm}^2$) Abschlussfläche gewählt und automatische Optimierungsalgorithmen zur Erzeugung einer Freiformfläche angewandt. Zielsetzung der Optimierung war eine Steigerung sowohl der horizontalen als auch der vertikalen Kollimierung des Lichts. In Abb. 11 sind der resultierende Stab in Seitenansicht und die Simulationsergebnisse zu sehen.

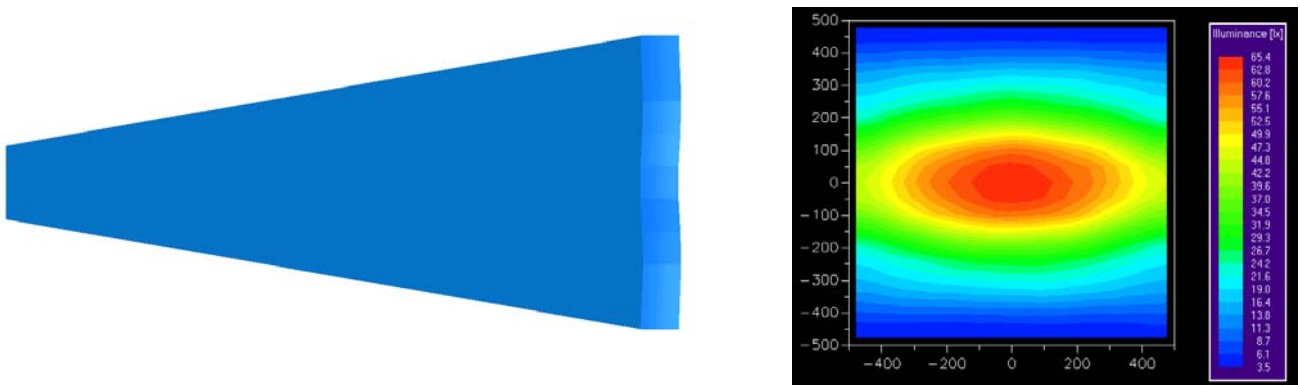


Abb.11: a) Abgeschrägter LMR mit optimierter Freiformabschlussfläche
b) Beleuchtungsstärkeverteilung in 1000mm Entfernung

Ein Vergleich mit der Verteilung vor der Optimierung zeigt, dass keine wesentliche Verbesserung erreicht werden konnte. Es ist lediglich eine kleine Steigerung der Gleichförmigkeit bei ansonsten sehr ähnlicher Form zu erkennen. Die Austrittsfläche alleine kann offensichtlich die Verwischung in den Randbereichen nicht beheben. Infolgedessen werden wir im Folgenden weitere Oberflächen in den Designprozess mit einbeziehen.

4.2 Zwischenstufe des LGR

Im nächsten Schritt betrachten wir eine Zwischenstufe des LGRs auf dem Weg zur Erzeugung des Linienlichts. Dazu ersetzen wir zwei der bisher ebenen Seitenflächen durch Freiformflächen, die durch Extrudieren von maßgeschneiderten Kurvenabschnitten erzeugt werden. Abb. 12 a) zeigt eine Perspektivansicht des geschaffenen Vollmaterial LGRs. Aus dem Simulationsergebnis in Abb. 12 b) kann man die Funktionsweise des LGR folgern:

In der vertikalen Ebene findet die Ausbreitung der Lichtstrahlen in sequentieller Art über die Freiformfläche statt und erreicht ein sehr hohes Maß an Kollimation. In der horizontalen Ebene dagegen sorgen die ebenen Flächen für einen nicht sequentiellen Charakter der Lichtausbreitung. Aus dieser Vermischung resultiert eine Verteilung, die einem Linienlicht schon recht nahe kommt, wobei die zwei „Hot spots“ in Abb. 12 b) noch störend sind.

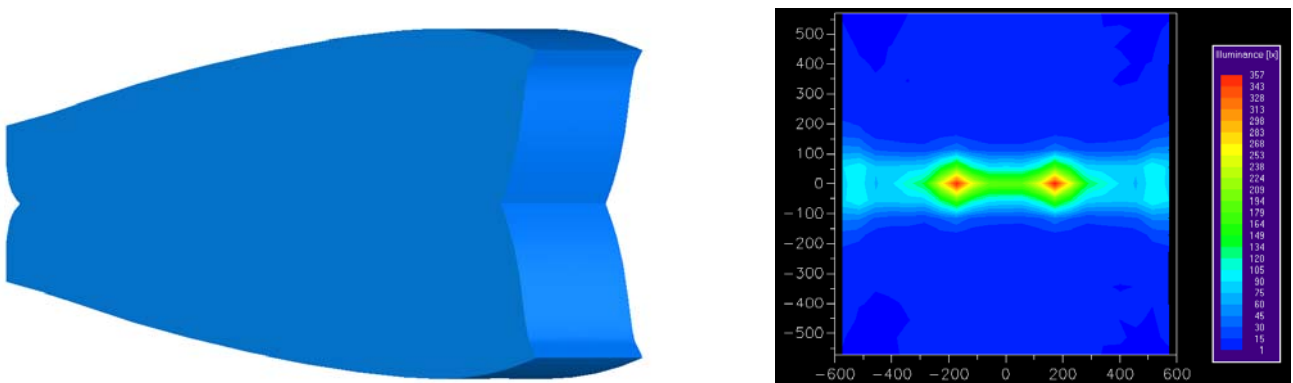


Abb. 12 : LGR Zwischenstufe a) Perspektivansicht b) Beleuchtungsstärkeverteilung in 1000mm Entfernung

4.3 Maßgeschneiderter LGR

Motiviert durch die Verbesserung, die wir durch Einbeziehung von maßgeschneiderten Freiformflächen erzielen konnten, werden wir im folgenden Abschnitt einen LGR entwerfen, bei dem auch die ebenen Seitenfläche des zwischen LGRs durch Freiformkurven ersetzt werden. Das heißt, dass die Ausbreitung der Lichtstrahlen vollständig sequentiell

behandelt wird. Die Endfläche muss in diesem Ansatz eben sein, da sowohl Licht in der horizontalen, als auch in der vertikalen Ebene geführt wird und somit jeder Punkt der Austrittsfläche eine Doppelfunktion erfüllt.

Die angestrebte Lichtverteilung auf dem Detektor soll eine Fläche von $100 \times 700 \text{ mm}^2$ möglichst konstant beleuchten. Das entspricht einem Aspektverhältnis von 1:7. Zur Umsetzung dieses Ziels berechneten wir eine Reihe von neuen Maßschneider-Kurven. Indem eine dieser Kurven entlang einer anderen extruiert wird, konnten wir eine Eintrittsfläche erzeugen, die den größten Teil des Lichts in der gewünschten Weise auf die Seitenflächen lenkt. Diese wiederum wurden in der vertikalen Ebene ähnlich wie beim Zwischen LGR so gestaltet, dass eine starke Kollimierung erreicht wird. In der horizontalen Ebene dagegen wurde eine konstante, breitere Verteilung auf dem Detektor als Vorgabe für das Maßschneiden verwendet.

Um wieder einen Vollmaterial-LGR zu erhalten, haben wir die Lücken zwischen den Freiformflächen passend aufgefüllt und erhalten letztlich das optische System, das in Abb. 13 dargestellt ist.

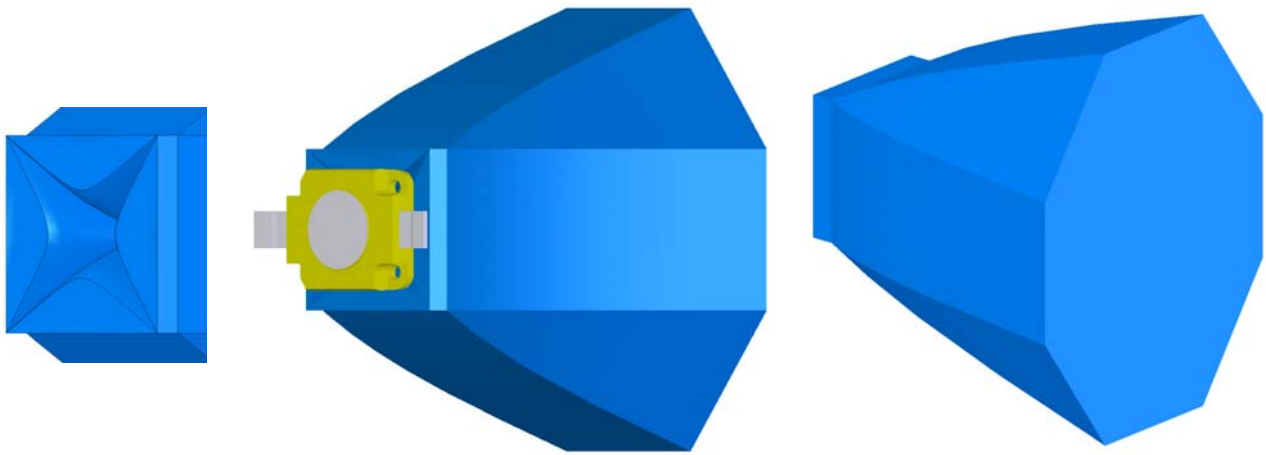


Abb. 13 : Sequentiell arbeitender LGR, a) Eintrittsfläche b) Rückansicht c) Frontansicht

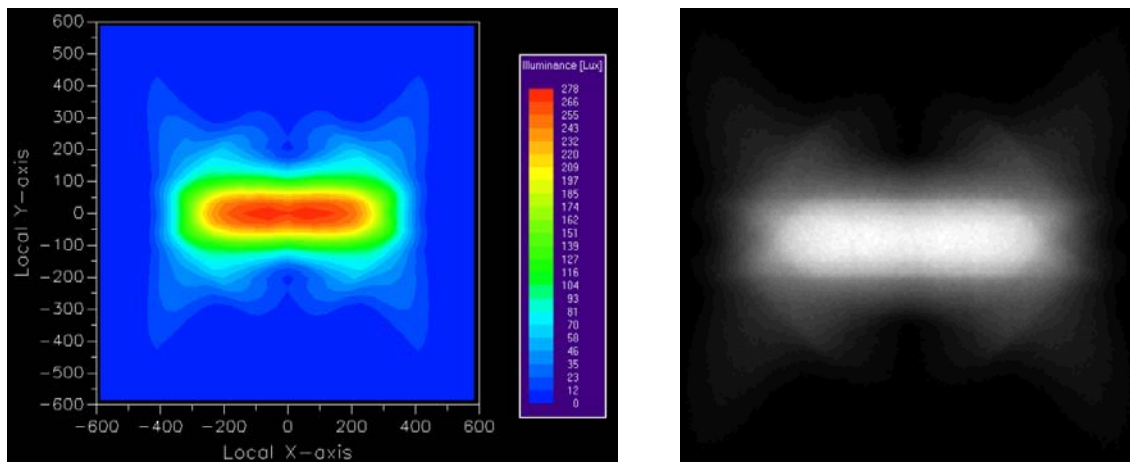


Abb. 14 : Simulationsergebnisse für die Beleuchtungsstärke in 1000mm Entfernung in

a) Falschfarben

b) Schwarz-Weiß-Ansicht

Die Simulationsergebnisse ergeben, dass 86,7% des Lichts der LED auf dem gewünschten Weg über die Eintrittsfläche und die Totalreflexion an den Seiten schließlich den Stab verlässt und so zu dem Linienlicht beiträgt. Weitere 5,5% des Lichts treffen auf dem Weg durch den LGR die oben genannten Füllflächen und bewirken die in Abb. 14 sichtbare Verwischung der Verteilung an den Rändern.

Vergleicht man die Ergebnisse dieses LGR-Designs mit den vorherigen, dann kann man klar eine deutliche Verbesserung der Gleichförmigkeit erkennen. Das angestrebte Linienlicht konnte recht gut erreicht werden.

Es bleibt eine Herausforderung, eine Beleuchtung zu realisieren, die gleichzeitig ein hohes Aspektverhältnis und eine hohe Gleichförmigkeit bietet. Die von uns verwendeten Oberflächen sind durch Extrudieren von zweidimensionalen Freiformkurven entstanden und daher begrenzt in ihrer Möglichkeit, die genannten Spezifikationen zu erfüllen. Das heißt, das obige Beispiel stellt die Obergrenze ihrer Leistungsfähigkeit dar.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Einsatz von LEDs in der Allgemeinbeleuchtung ist noch in seiner frühen Entwicklungsphase. Die Ergebnisse, die in diesem Paper präsentiert werden, zeigen, dass Lichtleitstäbe(LGRs) vielfältige und hocheffiziente optische Bauteile für LED basierte Beleuchtungsaufgaben sein können. Nachdem wir zunächst die Wirkungsweise allgemein üblicher Lichtmischstäbe(LMRs) im Detail untersucht haben, präsentierten wir eine Erweiterung durch die Verwendung spezieller Freiformflächen. Die so gewonnenen Freiheitsgrade erlauben es, verschiedene Fläche mit vordefinierten Funktionen zu versehen. Das ist eine bemerkenswerte Erweiterung der Designmöglichkeiten, denn damit ist es möglich, beispielsweise eine homogene Beleuchtung auf der Lichtaustrittsfläche zu erreichen und gleichzeitig eine beliebige Intensitätsverteilung im Fernfeld zu realisieren. Darüber hinaus bringen es unsere Methoden mit sich, dass der LGR sowohl in der Länge flexibel ist, als auch auf Lichtquellen unterschiedlicher Abstrahlcharakteristik angepasst werden kann.

Wir haben zur Berechnung der Freiformkurven Maßschneideralgorithmen angewandt. Dabei haben wir die Grenzen aufgezeigt, die diese Art des Designs von LGR hat. Wir konnten in einem Vergleich zwischen den üblichen LMRs und unseren maßgeschneiderten LGR demonstrieren, dass durch unsere Herangehensweise vielfältige neue Möglichkeiten entstehen und dass das austretende Licht wesentlich besser kontrolliert werden kann.

Ein Schlüsselement der von uns präsentierten LGRs ist ihre sequentielle Arbeitsweise, die sie von den LMRs unterscheidet. Daraus folgert eine erhöhte Sensitivität vor allem bezüglich der Lichtquellenposition, die für eine mögliche Anwendung beachtet werden muss.

Maßschneideralgorithmen dienten uns zur Berechnung von Kurvenabschnitten, aus denen die Oberflächen der LGR durch Extrudieren oder Rotieren hervorgingen. In welcher Weise ein vollständig auf Maßschneiderkurven beruhender LGR entstehen kann und welche Möglichkeiten sich dabei bieten, haben wir anhand der Beispiele eines Linienlichts und eines Kollimators vorgeführt und unsere Resultate in Form von simulierten Lichtverteilungen dargestellt.

Es sind weitere Bemühungen im Gange, die Maßschneidermethoden von Kurven auf Oberflächen zu erweitern. Dies kann die sequentiell arbeitenden LGR, wie sie in diesem Paper vorgestellt wurden, weiter in Richtung eines Maximums an Effizienz treiben und komplexere Zielverteilungen zugänglich machen.

LITERATUR

- [1] Cassarly, Davenport, "Non-rotationally symmetric mixing rods", International Optical Design Conference, SPIE Vol. 6342 (2006).
- [2] Cassarly, Davenport, "Recent Advances in Mixing Rods", Illumination Optics, SPIE Vol. 7103 (2008).
- [3] Davenport, Hough, Cassarly, "Optimization for Efficient Angle-to-Area Conversion in Illumination Systems", SPIE Vol. 5524 (2004).
- [4] Domhardt, Rohlfing et al., "New Design Tools for LED Headlamps", SPIE Photonics Europe, SPIE Vol. 7003 (2008).
- [5] Specht, Schwenkschuster, "Cut-off Generation for LED- Headlamps", 7th International Symposium on Automotive Lighting, ISAL Vol. 12 (2007).