

# Ein Source-Target-Mapping-Ansatz durch inverses Raytracing zur Berechnung von reflektiven Freiformoptiken

A. Sigel\* und A. Heinrich

\*Zentrum für optische Technologien, Hochschule Aalen, Anton-Huber-Straße 21, 73430 Aalen

<mailto:andre.sigel@hs-aalen.de>

In the field of nonimaging optics the problem arises to determine a certain reflector geometry which generates a specific intensity distribution for a given light source. Starting with an intensity distribution defined on a three-dimensional target a numerical algorithm is proposed to calculate a suitable reflector element. The designed reflector is validated by Monte Carlo ray tracing.

## 1 Einführung

Im Bereich der Beleuchtungsoptik besteht das inverse Reflektorproblem. Hierbei stellt sich die Fragestellung, wie ausgehend von einer definierten Lichtquelle ein Spiegel deformiert werden muss, damit eine spezifische Abstrahlcharakteristik erzeugt wird.

Die Lösungsansätze für diese Problemstellung sind vielfältig und unterteilen sich in analytische und numerische Ansätze. Analytische Ansätze [1] basieren auf der Herleitung und Lösung von partiellen Differentialgleichungen und können in der Regel nur für einen eingeschränkten Anwendungsbereich, z.B. für die Transformation von gaussförmigen zu rechteckigen Intensitätsverteilungen, genutzt werden.

Lösungsansätze aus dem Feld der Numerik basieren zum einen auf facettierten Reflektoren [2], bei denen definierte Strahlungsanteile der Quelle über die Facetten zu Zielpunkten auf der zu beleuchtenden Oberfläche geführt werden. Die Alternative besteht in sogenannten Brute-Force-Ansätzen bei denen durch einen Optimieransatz eine hohe Anzahl von Kontrollpunkte in der durch Splines beschriebenen Oberfläche hinsichtlich der XYZ-Position optimiert werden [3].

In diesem Beitrag wird ein numerischer Ansatz für einen facettierten Reflektor dargestellt.

## 2 Die Leitapplikation

Für einen miniaturisierten 3D-Sensor auf Grundlage der Lasertriangulation (siehe Abb. 1 A) wird ein reflektives Optikelement benötigt, um innerhalb einer Kavität eine Lichtschnittebene zu generieren und eine Punktwolke zu berechnen (siehe Abb. 1 B, C). Die zu erfassende Kavität weist dabei die Kontur eines Langloches auf und ist spiralförmig gewunden. Durch Anpassung einer etwa konischen Reflektorgeometrie soll ein Beleuchtungselement integriert werden, welches eine Liniengenerierung konstanter Bestrahlungsstärke auf der abzutastenden Oberfläche gewährleistet.

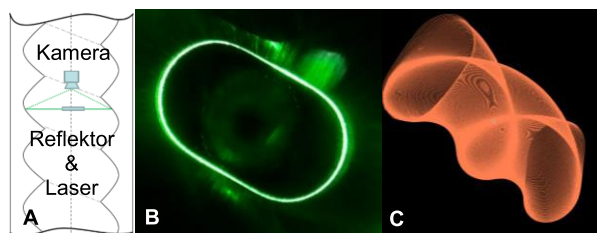


Abb. 1 (A) Setup für einen miniaturisierten 3D-Sensor (B) Einzelner Lichtschnitt (C) Punktwolke einer Kavität

## 3 Problemstellung

Bei einem konischen Reflektorelement wird die Bestrahlungsstärke immer mit dem Abstand zum Sensorelement abnehmen. Aus diesem Grund werden Areale mit einem großen Abstand entsprechend Abb. 2 A, B zum Sensor schwächer ausgeleuchtet und nicht oder mit erhöhter Messunsicherheit erfasst. Da die Form des Langloches bis auf Fertigungsfehler bekannt ist, soll der Reflektor gezielt deformiert werden, um eine Linie konstanter Intensität für diese Geometrie zu generieren.

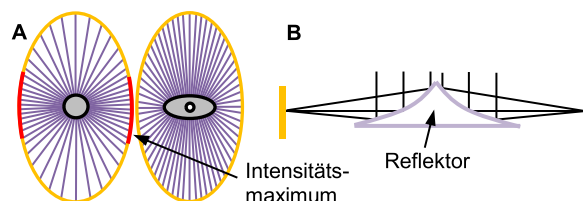
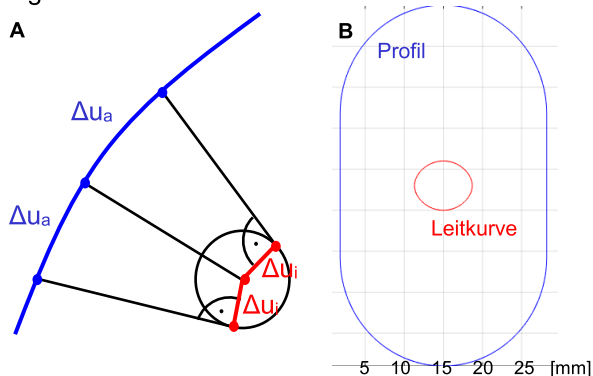


Abb. 2 Geometrievorschlüsse zur optimierten Ausleuchtung einer Kavität in der (A) Auf- und (B) Seitenansicht

## 4 Ansatz zum Source-Target-Mapping

Der Ansatz zur Berechnung der Reflektorgeometrie beruht auf einer kollimierten Beleuchtung. Das zu beleuchtende Profil wird zunächst in Liniensegmente  $\Delta u_a$  gleicher Länge diskretisiert. Da eine konstante Bestrahlungsstärke erzielt werden soll, müssen diese Liniensegmente nun mit Flächeninhalten im Strahlquerschnitt der kollimierten Beleuchtung über das Reflexionsgesetz verknüpft werden. Bei gleichbleibender Spiegelbreite entspricht so ein Flächenelement einem konstanten Längenmaß  $\Delta u_i$  auf dem Spiegel. Abschnitte auf

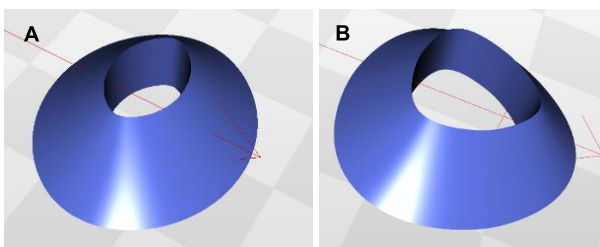
dem Reflektor  $\Delta u_i$  beleuchten Abschnitte auf dem Profil  $\Delta u_a$  entsprechend Abb. 3 A. In der Kombination ergeben alle Abschnitte  $\Delta u_i$  eine Leitkurve auf dem Reflektor. In Abb. 3 B wird das Ergebnis der numerischen Berechnung für die Leitapplikation dargestellt.



**Abb. 3** (A) Strategie zu numerischen Berechnung einer Leitkurve für einen Reflektor (B) Komplette Leitkurve

Zur Berechnung wird zunächst ein Startpunkt für die Leitkurve gewählt. Kandidaten für den nächsten Stützpunkt auf der Leitkurve zeichnen dann einen Kreis mit dem Radius  $\Delta u_i$  auf. Damit die Korrelation zwischen Leitkurve und Profil erfolgreich ist, muss das Reflexionsgesetz für den nächsten Punkt gelten. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Strahl zwischen Leitlinie und Profilpunkt diesen aufgespannten Kreis tangiert. Durch diese Überlegung bzw. eine geometrische Lösung kann die Anzahl der möglichen Kandidaten für den nächsten Kontrollpunkt der Leitkurve auf zwei reduziert werden. Durch die Umlaufrichtung ist der nächste Punkt dann klar definiert. Wird die Vorgehensweise für alle Punkte auf dem Profil bzw. auf der Leitlinie wiederholt, ergibt sich für genau ein Verhältnis  $\Delta u_a/\Delta u_i$  eine geschlossene Kurve.

Da die kollimierte Strahlung auf das Profil fokussiert werden soll, kann für jeden Kontrollpunkt auf der Leitkurve eine entsprechende Parabelkurve ermittelt werden, um den Reflektor in der dritten Dimension zu konstruieren. Zwei Beispiele für berechnete Reflektoren dargestellt über ein stl-Dreiecksnetz werden in Abb. 4 A, B gezeigt.

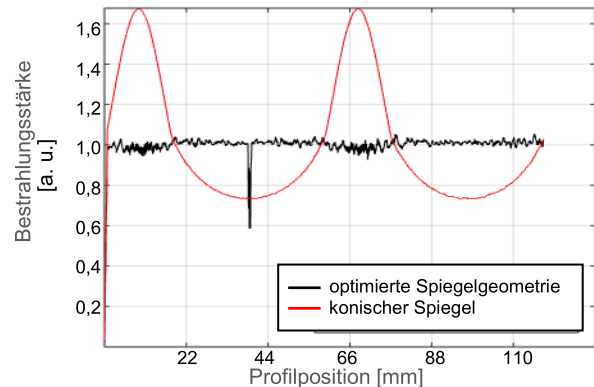


**Abb. 4** Berechnetes Reflektormodell für ein (A) Langlochprofil und für ein (B) Dreiecksprofil

## 5 Vergleich mit konischer Geometrie

Zur Evaluierung berechneter Reflektorgeometrien wurde durch eine Monte-Carlo-Simulation die durch den Spiegel generierte Intensitätsverteilung

ermittelt. Zum Vergleich wurde auch die Abstrahlcharakteristik eines konischen Spiegels mit ringförmiger Beleuchtung betrachtet. Die Analyse zeigt entsprechend Abb. 5, dass die Intensitätsverteilung durch den numerisch berechneten Reflektor nach obigem Ansatz geringere Schwankungen in der Bestrahlungsstärke aufweist.



**Abb. 5** Intensitätsverteilung durch Reflektor nach numerischem Algorithmus im Vergleich zu einem konischen Spiegel

## 6 Zusammenfassung

Durch den dargestellten numerischen Algorithmus können geeignete Reflektorgeometrien für die Beleuchtungsapplikation berechnet werden. Obwohl durch das Modell Linien geringer Breite und annähernd konstanter Bestrahlungsstärke generiert werden, ist dieses Modell jedoch durch den Fokus der reflektierten Strahlen limitiert.

Außerhalb der erzielten Fokusposition werden breitere Linien erkannt. Dies ist hinderlich, da in der Leitapplikation Messungen in einem Messbereich durchgeführt werden sollen. Ein weicher Fokus kann erzielt werden, indem zur Leitlinie geringere Spiegelbreiten im kollimierten Strahl gewählt werden. Mit einer geringeren Querschnittsfläche im kollimierten Strahl der Quelle wird jedoch ebenfalls der reflektierte Leistungsanteil reduziert.

## Danksagung

Die Autoren danken der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH für die Finanzierung des Projektes im Bereich der additiven Fertigung von reflektiven optischen Komponenten (Förderkennzeichen SOM3D).

## Literatur

- [1] D. L. Shealy, S. H. Chao: "Design and analysis of an elliptical laser beam shaping system", SPIE Vol. 4443, 2001
- [2] F. R. Fournier, W. J. Cassarly, J.P. Rolland: "Designing freeform reflectors for extended sources", SPIE Vol. 7423, 2009
- [3] M. Finckh, H. Dammertz, H.P.A. Lensch: „Geometry Construction from Caustic Images“, K. Daniilidis (Hrsg.): Computer Vision – ECCV 2010, Springer, ISBN 978-3-642-15555-0, Berlin, Heidelberg, 2010