

DOI: [10.22032/dbt.39621](https://doi.org/10.22032/dbt.39621)

Simulation und Design mikrostrukturierter Linsen für automobiler Scheinwerfer

Dennis Zimmermann¹, Cornelius Neumann²¹HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt, E-Mail: dennis.zimmermann@hella.com²Lichttechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Übergang des hellen in den dunklen Bereich einer Scheinwerferlichtverteilung unterliegt gesetzlichen Auflagen. Bei Scheinwerfer-Projektionssystemen wird der Übergang durch eine streuende Struktur auf der Linsenfläche aufgeweicht. Bisher erfolgte die Auslegung manuell. Diese Arbeit befasst sich mit der Auslegung strukturierter Flächen unter Anwendung von genetischen Algorithmen. Die Anforderungen an die Hell-Dunkel-Grenze eines Scheinwerfers werden erläutert. Es werden Verfahren dargestellt, um CAD-Flächen mit einer streuenden Struktur zu überlagern. Damit die Auslegung strukturierter Linsenflächen durch Optimierungsalgorithmen ermöglicht werden konnte, musste die Zeit für eine lichttechnische Simulation der Fläche reduziert werden. Die verwendete Simulationsmethodik wird erklärt und erste Ergebnisse diskutiert.

1 Einleitung

Aufgrund der größer werdenden Individualität von Scheinwerfern müssen deren Entwicklungskosten und -zeiten immer weiter reduziert werden, um einen wirtschaftlichen Prozess zu erreichen. Einerseits müssen die Kundenanforderungen erfüllt, andererseits Gesetzesvorgaben wie ECE oder FMVSS eingehalten werden [1, 2]. Unter anderem definieren diese Vorschriften das Verhalten des Übergangs von dem hellen in den dunklen Bereich der Scheinwerfer-Lichtverteilung, der sogenannten Hell-Dunkel-Grenze (HDG). In Abbildung 1 sind Lichtverteilungen mit unterschiedlichen HDGs dar-



Abbildung 1: Lichtverteilung von Scheinwerfern auf einer Wand. A: Verteilung mit zu harter HDG. B: Verteilung mit weicher, gesetzeskonformer HDG.

gestellt. Die Verteilung in Abbildung 1A hat im Vergleich zur Abbildung 1B eine zu harte, nicht-gesetzeskonforme HDG. Bei Projektionssystemen, wie in Abbildung 2 skizziert, wird die Härte der HDG durch eine Strukturierung der Lichtaustrittsseite der Linse angepasst. Durch die Struktur wird ein Teil des austretenden Lichtes gestreut,

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, Deutschland.



This is an **Open Access** article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution ShareAlike-4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

wodurch die HDG aufweicht. Da die Amplituden der Strukturen im Bereich weniger Mikrometern liegen, wird der Begriff Mikrostruktur verwendet.

Ein Prozess, um Linsenflächen mit einer Mikrostruktur zu überlagern und Stahlwerkzeug für ein Spritzgussverfahren herzustellen, wurde im Rahmen des Förderprojektes

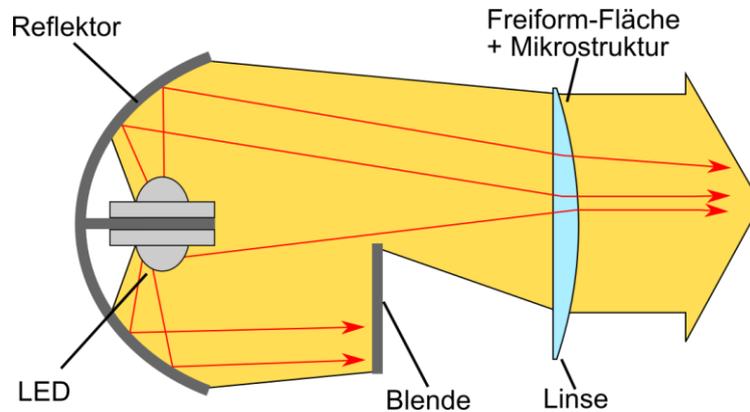


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Projektionsscheinwerfers.

ePiTec aufgesetzt [3, 4]. Die Auslegung der Struktur erfolgte dabei durch ein erfahrungsbasiertes „Try-And-Error“-Verfahren. Diese Arbeit befasst sich mit der automatisierten Auslegung mikrostrukturierter Linsen unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen. Es werden die Anforderung an die Struktur erläutert und das mathematische Modell zur Beschreibung mikrostrukturierter Linsen erklärt. Um eine Auslegung via Optimierungsalgorithmus zu ermöglichen, musste die Simulationszeit stark reduziert werden. Die neue Simulationsmethodik wird erläutert und erste Ergebnisse werden präsentiert.

2 Anforderungen

Der Gradient der HDG ist gegeben durch [1]

$$G(\beta) = \log(E(\beta)) - \log(E(\beta + 0.1^\circ)), \quad (1)$$

wobei E die Lichtstärke bei dem vertikalen Winkel β angibt. In den ECE-Regelungen ist vorgegeben, dass die Gleichung (1) bei einem horizontalen Winkel von -2.5° ausgewertet wird. Die sich ergebene Kurve muss ein eindeutiges Maximum mit einem Wert zwischen 0,13 und 0,4 haben. In Abbildung 3 sind Beispiele von Gradientenkurven dargestellt.

3 Strukturierung von optischen Flächen

Sowohl die verwendete CAD-Software zur Auslegung von optischen Flächen, als auch die zur Simulation verwendete Ray-Tracing-Software basierte auf Non-Uniform Rational Basic Spline (NURBS)-Flächen [5]. Daher musste die strukturierte Linsenfläche in NURBS beschrieben werden. Zwei verschiedene Verfahren wurden angewandt, um

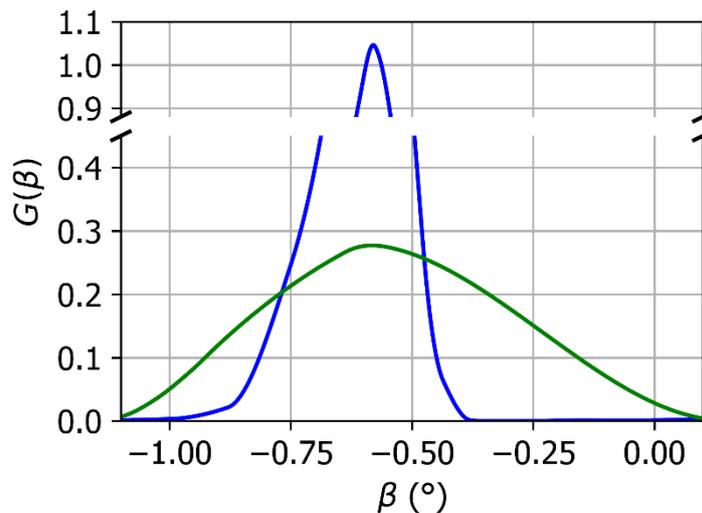


Abbildung 3: Beispiele für Gradienten-Kurven. Blau: Linse ohne Struktur. Grün: Linse mit Struktur.

eine optische Fläche mit einer Mikrostruktur zu überlagern. Beide Verfahren sind in Abbildung 4 skizziert. Ausgehend von der unstrukturierten Fläche (vgl. Abbildung 4A) wurde ein äquidistantes Punktgitter auf der Ausgangsfläche berechnet (vgl. Abbildung 4B). An den Positionen des Punktgitters wurden die Normalenvektoren berechnet und die Punkte entlang der Normalenvektoren verschoben, wodurch sich ein Punktgitter (vgl. grüne Kreuze in Abbildung 4B) ergab, das die strukturierte Fläche repräsentierte. Durch Interpolation der Punkte mit einem kubischen B-Spline wurde die mikrostrukturierte Fläche erstellt (vgl. Abbildung 4C) [5].

Bei der zweiten Methode zur Strukturierung einer Fläche wurde ebenfalls ein Punktgitter der Ausgangsfläche berechnet (vgl. Abbildung 4D). Anstatt die Punkte zu verschieben, wurde ein interpolierender kubischer B-Spline auf Basis dieser Punkte bestimmt. Die neue Fläche ist geometrisch nahezu identisch mit der alten Fläche, enthält jedoch eine höhere Anzahl an Kontrollpunkten (vgl. Abbildung 4D). Die Strukturierung der Fläche wurde erzeugt, indem die Kontrollpunkte verschoben wurden (vgl. Abbildung 4E).

Bei der ersten Methode wirkte sich die Verschiebung der Punkte direkt auf die Geometrie der Fläche aus, da die Fläche die Punkte interpolierte. Eine Verschiebung eines Punktes um einen bestimmten Versatz verschob die Fläche um den Gleichen. Da bei der zweiten Methode die Kontrollpunkte verschoben wurden, war diese direkte Abhängigkeit nicht gegeben. Die zweite Methode hat die Vorteile der schnelleren Strukturierung der Fläche. Bei dem Optimierungsprozess wurden fortlaufend neue Strukturen generiert. Bei der ersten Methode musste dazu ein lineares Gleichungssystem gelöst werden, um die strukturierte Fläche zu bestimmen, wohingegen bei der zweiten Methode nur der Versatz zu den Koordinaten der Kontrollpunkte hinzuaddiert werden musste [5].

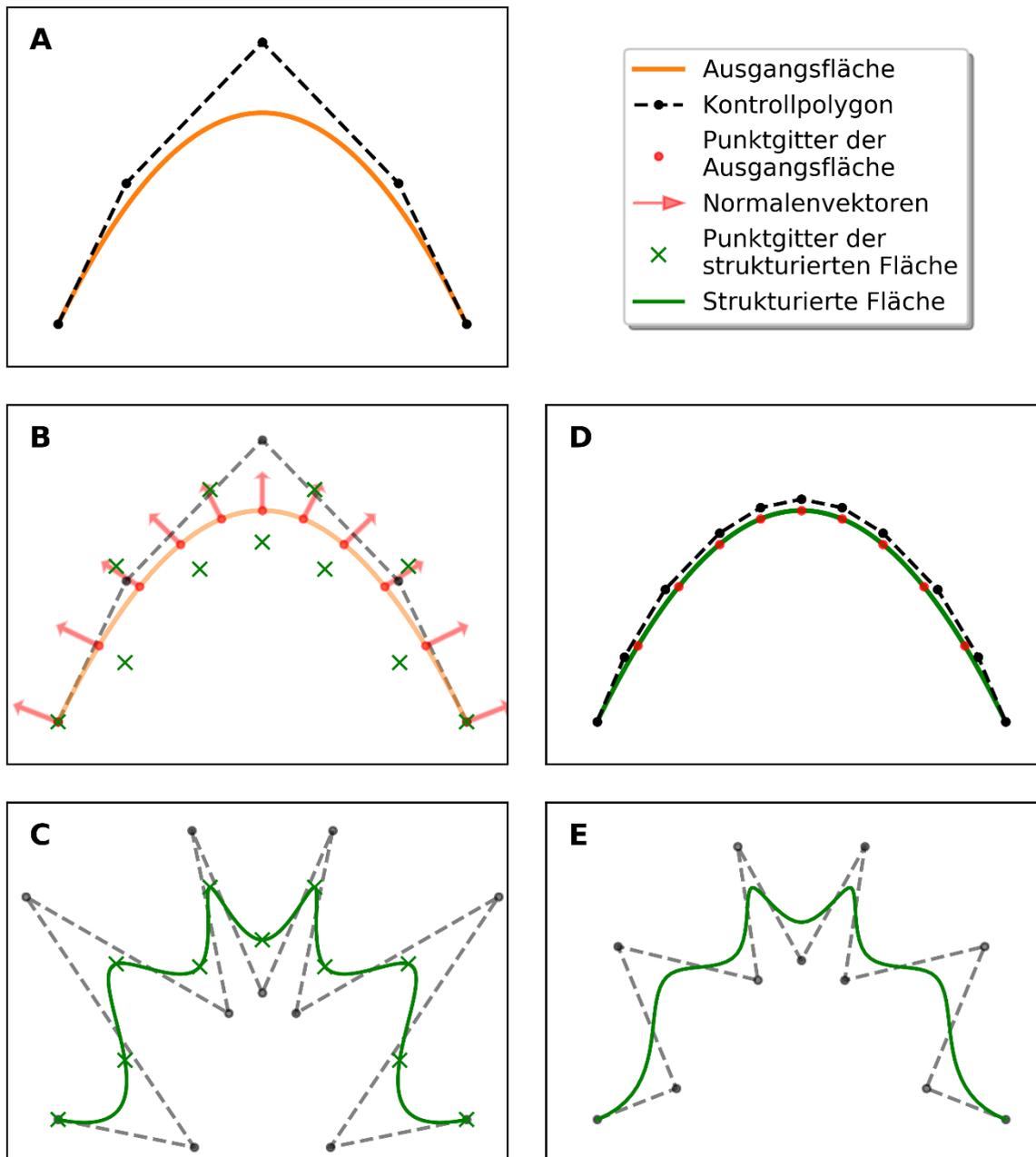


Abbildung 4: Schematische Darstellung von zwei Methoden zur Strukturierung einer Linsenfläche.

4 Simulation mikrostrukturierter Flächen

Zur Simulation der Lichtstärkeverteilung wurde das „Monte Carlo Ray Tracing“-Verfahren angewandt [6]. Das Licht wird dabei in Form von Strahlen modelliert, wobei jeder Strahl einen Lichtstrombetrag sowie eine Wellenlänge enthält. Der Weg der Strahlen wird ausgehend von einer Lichtquelle durch eine virtuelle Szenerie verfolgt, bis die Strahlen in einem Lichtstärkedetektor registriert werden. Ein Nachteil des „Monte Carlo

Ray Tracing“ besteht in der Simulation schwach beleuchteter Bereiche in der Lichtstärkeverteilung. Diese Bereiche werden im Verhältnis zu stärker ausgeleuchteten Bereichen von nur wenigen Strahlen getroffen, wodurch sich ein starkes Simulationsrauschen ergibt. Die Lichtstärkeverteilung oberhalb der HDG wird zur Berechnung der Gradienten-Kurve nach Gleichung (1) benötigt. Um eine verwendbare, das heißt nicht zu stark verrauschte, Gradienten-Kurve zu erhalten, mussten zur Simulation eines Scheinwerfers mehrere hundert Millionen Strahlen verwendet werden. Dadurch ergaben sich Simulationszeiten, die im Bereich mehrerer Minuten lagen. Bei einer Auslegung mikrostrukturierter Flächen durch einen Optimierungsalgorithmus mussten fortlaufend Simulationen durchgeführt, Gradienten-Kurven berechnet und bewertet werden. Simulationszeiten von mehreren Minuten würde zu einer Optimierungszeit von mehreren Monaten führen.

Zur Reduzierung der Simulationszeit wurde im ersten Schritt mit dem Aufbau aus Abbildung 5 simuliert. Der Aufbau entspricht dem kompletten Scheinwerfersystem aus-

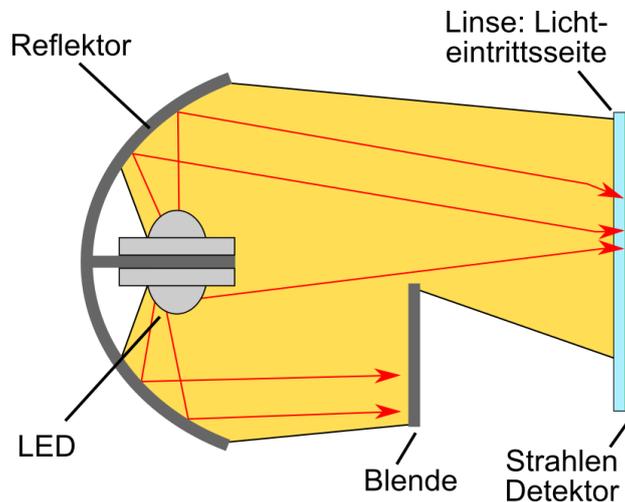


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Vorbereitung des Optimierungsprozesses.

schließlich der Lichtaustrittsseite der Linse sowie eines zusätzlichen Strahlendetektors hinter der Lichteintrittsseite der Linse. In dem Detektor wurden alle Strahlen gespeichert, die die Lichteintrittsseite der Linse passiert haben. Es werden die Koordinaten der Schnittpunkte mit der Detektorfläche, die Richtungsvektoren, die Wellenlänge und der Lichtstrom der Strahlen gespeichert. Durch diesen Schritt wurde eine Lichtquelle erstellt, die den Scheinwerfer ausschließlich der Lichtaustrittsseite der Linse modellierte. Im zweiten Schritt wurde eine Simulation mit der zuvor erstellten Strahlen-Lichtquelle und der Lichtaustrittsseite der unstrukturierten Linse durchgeführt (siehe Abbildung 6). Erreichten die Strahlen nach Brechung durch die Linse einen zuvor festgelegten Bereich (weißes Rechteck in Abbildung 6) in der Nähe der HDG, so wurden die Strahlen und die Koordinaten ihres Schnittpunktes mit der Linse abgespeichert. Das

Ergebnis war eine Strahlen-Lichtquelle, die nur die Strahlen enthält, die nach Brechung durch die Linse die HDG erzeugen.

Bei der Optimierung wurde die Strahlen-Lichtquelle verwendet, die nur die HDG-Nahen-Strahlen beinhaltet. Dadurch konnte die zur Simulation der Gradienten-Kurve benötigte Strahlenanzahl von mehreren hundert Millionen auf wenige Millionen herabgesetzt werden. Die Schnittpunkte zwischen Strahlen und den strukturierten Flächen

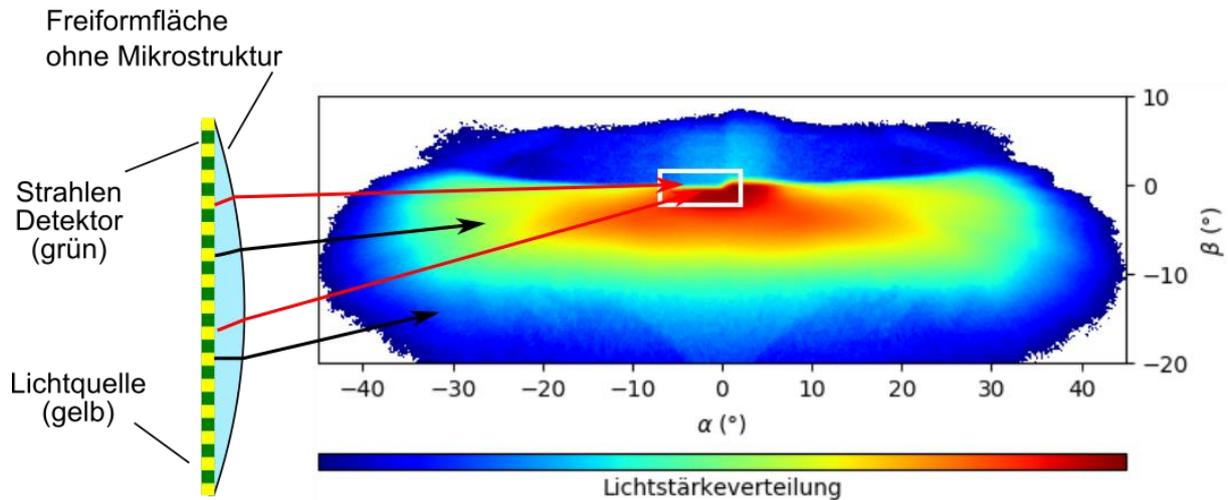


Abbildung 6: Zweiter Schritt zur Vorbereitung der Optimierung. Es wurde nach Strahlen gefiltert, die in der Lichtstärkeverteilung in der Nähe der HDG auftreffen.

wurden durch das Newton-Verfahren berechnet [7]. Zur weiteren Verkürzung der Simulationszeit wurden die zuvor abgespeicherten Koordinaten der Schnittpunkte als Startwerte für das Newton-Verfahren verwendet. Bei der Berechnung der Schnittpunkte und bei der Berechnung der Richtung der gebrochenen Strahlen mussten die B-Spline-Flächen ausgewertet und die Tangentialvektoren der Fläche berechnet werden. Anstatt den üblich verwendeten Cox-de-Boor Algorithmus zu verwenden, wurden die Basis-Funktionen durch „Single Instruction Multiple Data“-Anweisungen berechnet, wodurch die Auswertung der kubischen B-Spline-Flächen und die Berechnung beider Tangentialvektoren um einen Faktor 6 beschleunigt werden konnten [5, 8].

Insgesamt konnte durch die neue Simulationsmethodik unter Ausnutzung von Parallelisierung auf einem Intel Xeon E5-1650 v3 bei einer Simulation mit zehn Millionen Strahlen umgerechnet eine Simulationszeit von 1,8 Sekunden pro Struktur erreicht werden.

5 Auslegung von Mikrostrukturen durch Optimierungsalgorithmen

Zur Optimierung der Strukturen wurde ein genetischer Algorithmus verwendet [9]. Es wurden für jede in Kapitel 3 vorgestellte Methode zur Strukturierung eine Optimierung durchgeführt. Bei der ersten Methode wurden die Amplituden durch Normalverteilungen bestimmt. Dazu wurde das Punktgitter (vgl. Abbildung 4B) in Zellen der Größe

zwei mal zwei (vgl. Abbildung 7) eingeteilt. Jedem Punkt einer Zelle wurde eine Normalverteilung zugewiesen, sodass die Mikrostruktur durch vier Normalverteilungen bestimmt wurde. Die vier Standardabweichungen der Verteilungen waren die Parameter der Optimierung.

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurde zunächst eine Simulation des Scheinwerferaufbaus mit 500 Millionen Strahlen durchgeführt. Die Strahlen wurden gefiltert, sodass zur Optimierung eine Strahlen-Lichtquelle zur Verfügung stand, die sechs Millionen Strahlen enthielt und deren Strahlen in der Lichtstärkeverteilung in dem Bereich von -5° bis 1° horizontal und -1.25° bis 1° vertikal auftrafen. Das Punktgitter (vgl. Abbildung 4B und 7) hatte eine Rasterung von $100\ \mu\text{m}$. Für den genetischen Algorithmus wurde eine Populationsgröße von 42 verwendet, wobei die Elite sechs Kandidaten

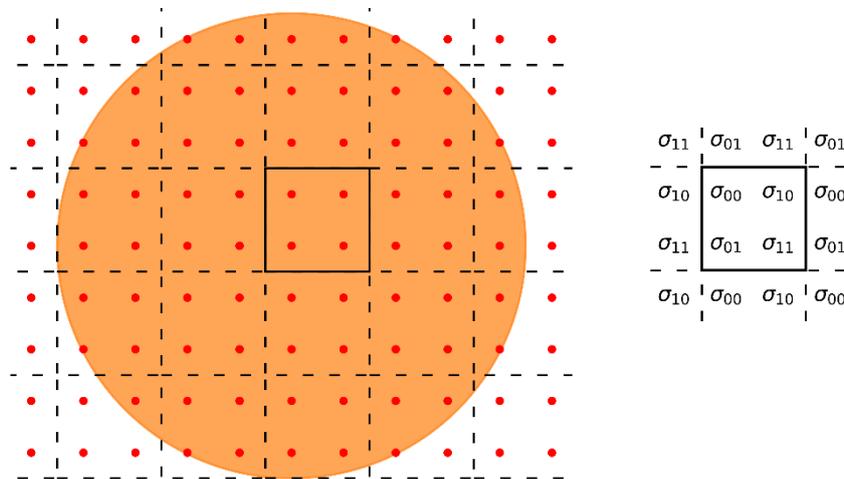


Abbildung 7: Draufsicht zur Abbildung 4B. Die Gitterpunkte wurden in Zellen (schwarze Rechtecke) zusammengefasst.

umfasste. Als Zielfunktion wurde der summierte quadratische Abstand zu einer Ziel-Gradienten-Kurve verwendet. Nach 140 Generationen wurde die in Abbildung 8A dargestellte Lichtstärkeverteilung generiert. In Abbildung 8B ist die Zielkurve und die Ergebniskurve dargestellt. Ein eindimensionaler Ausschnitt aus der erstellten Mikrostruktur ist in Abbildung 8C aufgezeigt. Die Struktur erzeugte eine HDG, deren Gradienten mit der Zielkurve im Rahmen des Simulationsrauschen übereinstimmt.

Zur Anwendung der zweiten Methode aus Kapitel 3 wurde der gleiche Scheinwerferaufbau wie bei der Anwendung der ersten Methode verwendet. Es wurden die Strahlen gefiltert, die in der Lichtstärkeverteilung in dem Bereich von -5° bis 1° horizontal und -3° bis 1° vertikal auftrafen. Da hier dem genetischen Algorithmus mehr Freiheitsgrade zur Verfügung standen, musste der vertikale Bereich vergrößert werden. Aus diesem Grund wurde eine Lichtquelle mit zehn anstatt sechs Millionen Strahlen erstellt. Ein Punktgitter mit $200\ \mu\text{m}$ Abstand wurde bestimmt und zur Berechnung einer Fläche verwendet (vgl. Abbildung 4D). Der genetische Algorithmus konnte zur Optimierung die Koordinaten der Kontrollpunkte (vgl. Abbildung 4E) in vertikaler und axialer Richtung der Linse verschieben. Durch den Linsendurchmesser von $70\ \text{mm}$ ergaben sich

700 Freiheitsgerade. Auf Grund der hohen Anzahl an Freiheitsgerade wurde eine Populationsgröße von 240 Kandidaten und eine Elite, die 12 Kandidaten umfasste, verwendet. Es wurden 1400 Generationen mit dieser Population simuliert und ausgewertet. Anschließend wurde die Populationsgröße auf 24 Kandidaten mit einer 12 Kandidaten großen Elite verringert, um eine schnellere Konvergenz zu erzielen und erneut 1400 Generationen simuliert und ausgewertet. Das Maximum der Zielkurve wurde im Vergleich zum ersten Versuch in negativer Richtung verschoben und die abfallende

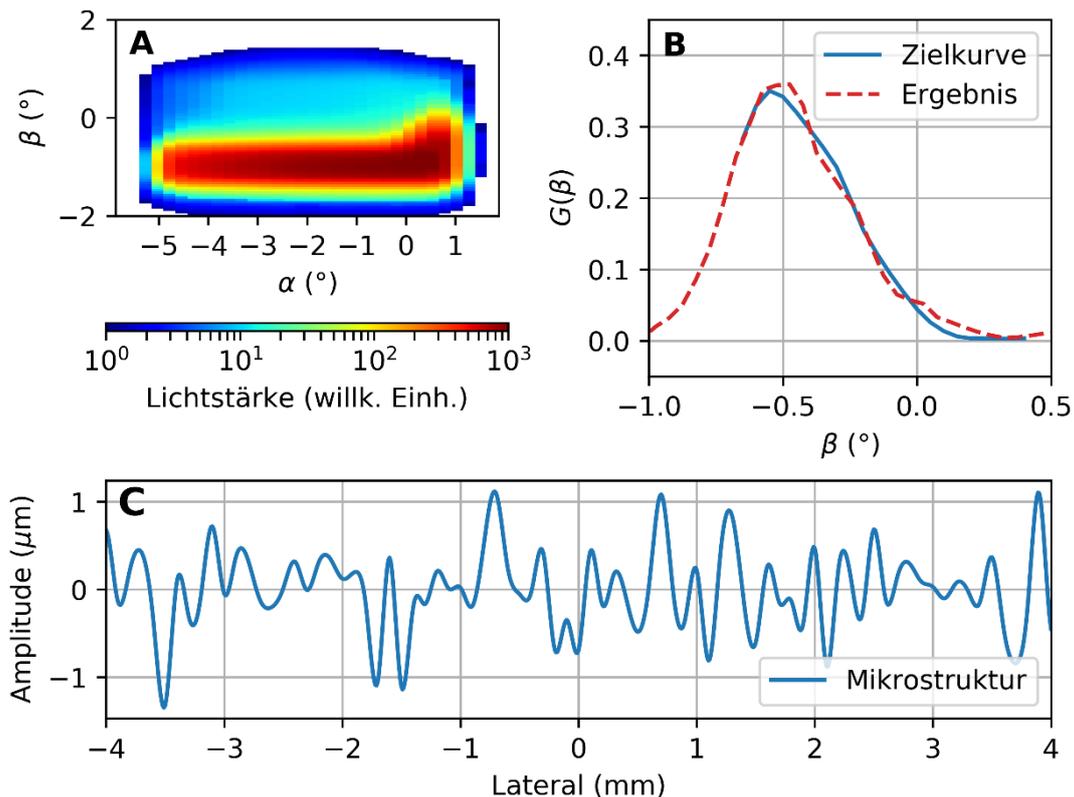


Abbildung 8: Ergebnisse der ersten Methode aus Kapitel 3. A: Finale Lichtstärkeverteilung. B: Vergleich zwischen Ziel- und Ergebnis-Gradient. C: Eindimensionale Darstellung der generierten Mikrostruktur. Die Grundfläche wurde durch eine Kurvenanpassung entfernt.

Flanke steiler gewählt (vgl. Abbildung 8B mit Abbildung 9B). Dadurch sollten die Werte der Lichtstärkeverteilung, die bei einem horizontalen und vertikalen Winkel von 0° liegen (sogenannter HV-Wert), reduziert werden [10]. Die finale Lichtstärkeverteilung ist in Abbildung 9A, die Ziel- und die Ergebniskurve in Abbildung 9B und ein Ausschnitt der Mikrostruktur in Abbildung 9C dargestellt. Die Zielkurve wurde ausschließlich des Bereiches nahe der Nulllinie gut reproduziert. Es zeigte sich bei einer Simulation der gesamten Scheinwerfer-Lichtstärkeverteilung, dass der HV-Wert 1270 cd betrug und damit deutlich über dem gesetzlichen Höchstwert von 625 cd war [10].

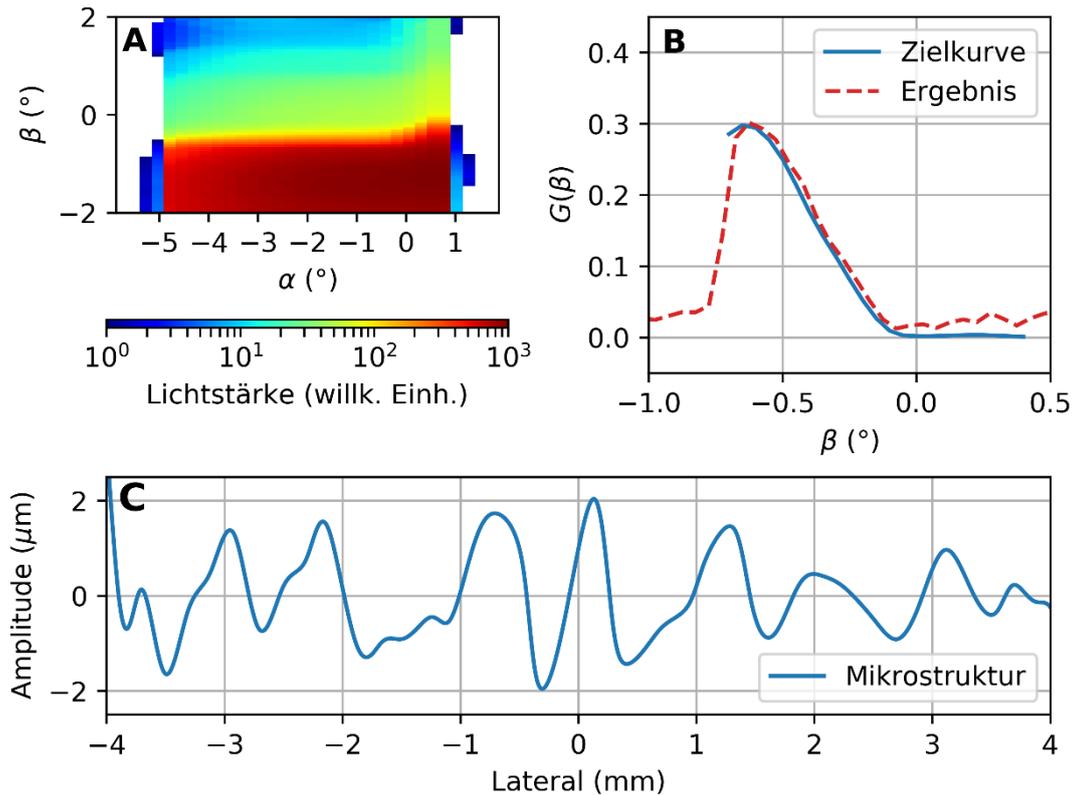


Abbildung 9: Ergebnisse der zweiten Methode aus Kapitel 3. A: Finale Lichtstärkeverteilung. B: Vergleich zwischen Ziel- und Ergebnis-Gradient. C: Eindimensionale Darstellung der generierten Mikrostruktur. Die Grundfläche wurde durch eine Kurvenanpassung entfernt.

6 Fazit und Ausblick

Mit der aufgezeigten Simulationemethodik konnte die Simulationszeit von ungefähr 10 Minuten auf wenige Sekunden reduziert werden. Dadurch wurde es ermöglicht, Mikrostrukturen unter Verwendung von genetischen Algorithmen auszulegen. Beide in Kapitel 3 vorgestellte Verfahren eignen sich, um Mikrostrukturen zu finden, die die vorgegebenen Gradienten gut reproduzieren. Jedoch wurde bei der zweiten Variante deutlich ein zu hoher HV-Wert erzielt. Daher müssen zukünftig nicht nur die Gradienten-Kurven beachtet werden, sondern auch Werte wie HV in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die optimalen Parameter für den genetischen Algorithmus zu finden, damit Optimierungszeiten weiter reduziert werden können.

Danksagung: Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen 02P14A103) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

7 Referenzen

- [1] Economic Commission for Europe, „ECE/TRANS/WP.29 /2007/77,“ 2007.
- [2] U.S. Department of Transportation, „FMVSS 108,“ 2007.
- [3] D. Zimmermann, A. Beutler, M. Brozio, S. Freutel, P. Kosse und C. Neumann, „A procedure for designing and manufacturing microstructured lenses used in automotive headlamps,“ *Advanced Optical Technologies*, (Wird Veröffentlicht).
- [4] C. Wenzel, A. Stockfisch, T. Weske und D. Zontar, „Effiziente Produktion von komplexen Kunststoffoptiken,“ *wt Werkstattstechnik online*, Nr. 5, pp. 388-393, 2019.
- [5] W. Tiller und L. Piegl, *The NURBS Book*, Springer, 1995.
- [6] M. Pharr und G. Humphreys, *Physically based Rendering*, Morgan Kaufmann, 2010.
- [7] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1999.
- [8] O. Abert, M. Geimer und S. Müller, „Direct and Fast Ray Tracing of NURBS Surfaces,“ in *IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, Salt Lake City, UT, 2006.
- [9] S. Luke, *Essentials of Metaheuristics (Second Edition)*.
- [10] Economic Commission for Europe, „Regulation No. 123, Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles,“ 2013.