

# Systematische Toleranzierung von additiv oder replikativ gefertigten Freiformflächen

Julia Unterhinninghofen\*, Yasin Özcan\*, Angelika Hofmann\*\*

\*Hochschule Koblenz, Konrad-Zuse-Str. 1, 56075 Koblenz

\*\*Hofmann Optikdesign, München

mailto:unterhinninghofen@hs-koblenz.de

Wir beschreiben ein systematisches Toleranzierungsverfahren für Freiformoptiken, mit dem typische Formabweichungen von additiven oder replikativen Fertigungsverfahren in der Simulation überprüft werden können. Dabei wird die Abhängigkeit der optischen Funktionskennzahlen von den Parametern häufiger Fertigungsverfahren für ein einfaches Modellsystem untersucht.

## 1 Toleranzierung von Freiformflächen

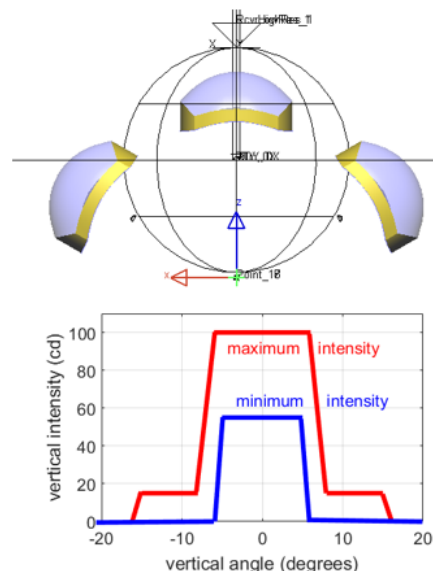
Die Toleranzierung von Freiformflächen für abbildende wie Beleuchtungsanwendungen beinhaltet neue und in der klassischen Optik unbekannte Herausforderungen. Es wird eine Vielzahl von Fertigungsverfahren eingesetzt; dazu zählen sowohl replikative Verfahren (z.B. Kunststoffspritzguss) als auch additive (z.B. Rapid Prototyping). Diese führen in Kombination mit der Vielfalt der gefertigten Geometrien zu Fehlerbildern, die ebenfalls durch Freiformgeometrien beschrieben werden müssen. Für eine Toleranzierung müssen also Methoden zum Einsatz kommen, die den komplexen Geometrien und vielfältigen Fertigungsverfahren Rechnung tragen.

Auf Grund der sehr großen Zahl möglicher Fehlerbilder werden bislang in der Praxis Formabweichungen in einer Toleranzierung häufig gar nicht oder wenn, dann nur global als maximale oder gemittelte Peak-to-Valley-Abweichung berücksichtigt. Diese Größe kann zwar einfach spezifiziert und auch messtechnisch überprüft werden, ist aber oft nicht gut mit den optischen Funktionskennzahlen korreliert [3].

Alternativ wird ein gefertigter Prototyp vermessen und die Sollfläche anhand der Messdaten so angepasst, dass die gemessene Abweichung kompensiert wird. Dies kann entweder durch direktes Invertieren der Messdaten geschehen oder indem diese durch geeignete Zernike-Polynome beschrieben werden [1]. Ersteres Verfahren führt bei verrauschten Messdaten zu Problemen, letzteres ist für stark von der Rotationssymmetrie abweichende Flächen ungeeignet. In [2] wurde ein ähnliches Toleranzierungsverfahren beschrieben, das stattdessen vorsieht, gemessene Fehlerbilder als Freiformabweichungen zu modellieren und so Toleranzbereiche festzulegen, in denen die optische Funktion den gewünschten Spezifikationen entspricht. Auch hierbei ist jedoch das zeitaufwändige Fertigen und Vermessen eines Prototyps notwendig.

## 2 Systematische Untersuchung von Toleranzen

Im Gegensatz dazu führen wir hier eine systematische Toleranzuntersuchung durch, wobei für das jeweilige Fertigungsverfahren typische Formabweichungen parametrisiert und simuliert werden. Durch Parametervariation können damit Toleranzbereiche für die Fertigung festgelegt werden. Als Modellsystem für diesen Ansatz betrachten wir im folgenden eine Freiformlinse für LED-Signal- oder Hindernisfeuer. Je nach Einsatzzweck (Schiffahrt, Flugfeuer, Hindernisbefuerung z.B. an Windkraftanlagen) unterscheiden sich die in nationalen und internationalen Normen festgelegten Lichtverteilungen, die meist Minimal- und Maximalwerte für die Lichtstärke in verschiedenen Winkelbereichen zur Horizontalen spezifizieren. Unser Modellsystem, das keiner konkreten Anwendung entspricht, ist in Abbildung 1 gezeigt.

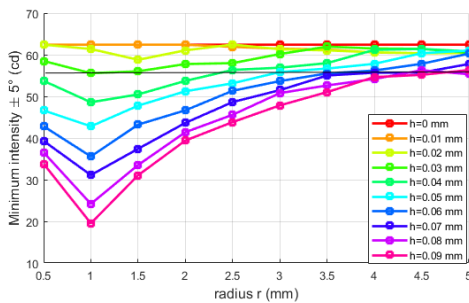


**Abb. 1** Oben: Freiformlinsen zur Erzeugung der gewünschten Lichtverteilung, unten: Minimal- und Maximalwerte für die Lichtstärke im Modellsystem.

### 3 Simulation typischer Fertigungsfehler

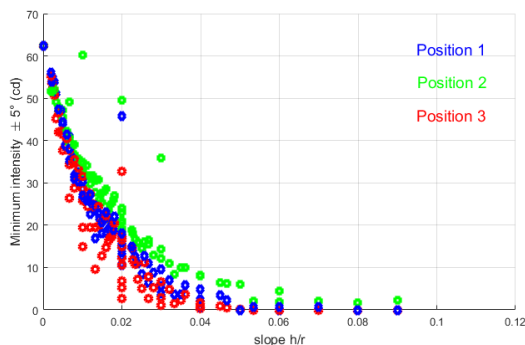
Wir untersuchen im Folgenden exemplarisch den Einfluss von zwei für Spritzguss- und additive Fertigung typischen Formabweichungen. Beim Spritzguss treten häufig Einsackungen auf. Diese können durch die drei Parameter Tiefe der Einsackung (entspricht der Peak-to-Valley-Abweichung), Radius und Position auf der Optikfläche beschrieben werden. Bei additiven Verfahren wiederum treten häufig Rillen auf. Sie sind durch ihre Amplitude (entspricht der Peak-To-Valley-Abweichung), Ortsfrequenz und Orientierung der Rillen zur Optikfläche festgelegt.

Wie zu erwarten gibt es bei einer Variation von Tiefe und Radius einer gaußförmigen Einsackung in der Mitte der Linsenaustrittsfläche keine einfache Abhängigkeit der Funktionskennzahlen von der maximalen (vgl. Abbildung 2) oder über die Fläche gemittelten Peak-to-Valley-Abweichung.



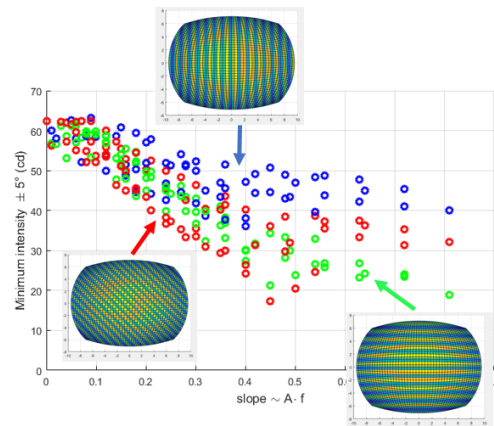
**Abb. 2** Minimum der Lichtstärke im Bereich  $\pm 5^\circ$  in Abhängigkeit vom Einsackungsradius  $r$  für verschiedene Einsackungstiefen  $h$ .

Vielmehr ergibt sich eine klare Korrelation mit dem maximalen Neigungsfehler der Optikfläche (vgl. Abbildung 3), wobei der Einfluss der Einsackung von ihrer Position auf der Optikfläche abhängt. Daher sind in verschiedenen Flächenbereichen oft unterschiedliche Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit notwendig für die Einhaltung der Spezifikationen. Diese Anforderungen können mit dem beschriebenen Verfahren bestimmt und somit spezifiziert werden.



**Abb. 3** Abhängigkeit der minimalen Lichtstärke vom maximalen Neigungsfehler ( $\sim h/r$ ) für verschiedene Positionen der Einsackung.

Ähnliche Ergebnisse finden sich auch bei der Simulation von sinusförmigen Rillen (vgl. Abbildung 4). In diesem Fall hängt der Einfluss auf die optischen Kennzahlen auch von der Bearbeitungsrichtung ab.



**Abb. 4** Abhängigkeit der minimalen Lichtstärke von der maximalen Neigungsabweichung ( $\sim A \cdot f$  mit Amplitude  $A$  und Ortsfrequenz  $f$  der Abweichung) für verschiedene Richtungen der Rillen entlang der Optikfläche.

An den exemplarisch untersuchten Formabweichungen wird deutlich, dass es nicht genügt, allein den maximalen Neigungsfehler zu spezifizieren. Stattdessen muss immer auch das konkrete Fertigungsverfahren mit seinen typischen Formabweichungen (inklusive Positionen bzw. Bearbeitungsrichtung) berücksichtigt werden. Das beschriebene Verfahren erlaubt dabei eine systematische Toleranzierung beliebig gefertigter Freiformflächen bereits vor der Pototypenerstellung.

### Literatur

- [1] I. Sieber, L. Li, U. Gengenbach, E. Beckert, R. Steinkopf und A. Y. Yi, "Optical performance simulation of free-form optics for an eye implant based on a measurement data enhanced model," *Appl. Opt.* **55** (2016).
- [2] A. Timinger, J. Unterhinninghofen, S. Junginger und A. Hofmann, "Tolerancing free-form optics for illumination," *Proc. SPIE* **8170** (2011).
- [3] A. Hofmann, S. Junginger und A. Timinger, "Toleranzen in der Beleuchtungsoptik: Freiformflächen, Arrays und 10 Millionen Strahlen," *Proc. DGaO* p. B20 (2011).