

Systematische Toleranzierung von Oberflächenrauheit additiv gefertigter Freiformoptiken

Julia Unterhinninghofen*, Sebastian Link*, Angelika Hofmann**

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

**Hofmann Optikdesign, München

mailto:unterhinninghofen@hs-koblenz.de

Wir stellen einen Ansatz zur systematischen Toleranzierung von Rillen und Oberflächenrauheit als häufige Abweichungen additiv gefertigter Freiformoptiken vor. Dabei werden Auswirkungen auf die optische Funktion an Hand unterschiedlicher Rauheitsmodelle untersucht.

1 Systematische Toleranzierung von Freiformflächen

Eine Toleranzierung von Freiformflächen für abbildende wie Beleuchtungsanwendungen muss vielfältigen Fertigungsverfahren ebenso gerecht werden wie vielfältigen Geometrien. Soll die Toleranzierung in systematischer Weise über die Berücksichtigung einer - in der Regel unzureichenden - maximalen oder gemittelten Peak-to-Valley-Abweichung hinaus geschehen, so müssen die auftretenden Formabweichungen ebenfalls als Freiformgeometrien beschrieben werden [1, 2, 3]. Hierfür müssen Fehlerbilder parametrisiert und simuliert werden, so dass sich die Auswirkung verschiedener Parameter auf optische Funktionskennzahlen des Systems untersuchen lässt und sinnvolle Toleranzbereiche für die Fertigung festgelegt werden können [4].

2 Beschreibung von Oberflächenrauheit

Die dafür notwendige messtechnische Erfassung, Modellierung und Simulation der Rauheit optischer Freiformflächen ist insbesondere im Bereich der Beleuchtungsoptik bzw. additiv oder replikativ gefertigter Optiken noch nicht Standard. Teilweise wird der in Mechanik und Werkzeugbau weit verbreitete *arithmetische Mittenrauwert*

$$R_a \sim \sum_{i,j} |\Delta z_{ij}| \quad (1)$$

(oder darauf basierende VDI 3400-Klassen) verwendet, obwohl dieser nicht mit der optischen Funktion korreliert [5]. Besser geeignet ist der *quadratische Mittenrauwert*

$$R_q \sim \sqrt{\sum_{i,j} \Delta z_{ij}^2}. \quad (2)$$

Für optisch glatte Flächen gilt dabei $R_q \ll \lambda$, für matte Flächen $R_q \gg \lambda$ (λ : Lichtwellenlänge). Additiv gefertigte Flächen befinden sich mit $R_q \approx 0.5 \dots 100 \mu\text{m}$ meist im Mischbereich $R_q \approx \lambda$.

Für klassische Abbildungsoptiken wird gewöhnlich der R_q gemäß der - vorrangig für polierte Optiken vorgesehenen - DIN ISO 10110 zur Spezifikation der Rauheit optisch glatter oder matter Oberflächen verwendet, wobei der Anwendungsbereich auf rein zufällige Oberflächengüten beschränkt ist. Dies trifft für polierte, geschliffene oder geätzte Oberflächen in der Regel zu, für Diamantdrehen/-fräsen sowie additive oder replikative Fertigungsverfahren hingegen nicht unbedingt. Letztere kommen insbesondere für Freiform- und/oder Beleuchtungsoptiken häufig zum Einsatz, wo zudem häufiger gewünschte Rauheiten eine Rolle spielen, die nicht einfach eine Obergrenze, sondern eine eindeutige Spezifikation der Rauheit erfordern.

Eine für all diese Fälle geeignete Beschreibung und Modellierung der Oberflächenrauheit mit entsprechender Toleranzierung zur funktionalen Festlegung der Spezifikationen wird derzeit an verschiedenen Stellen diskutiert, u.a. ist eine entsprechende VDI-Richtlinie (VDI/VDE 5596 Blatt 2) in Arbeit. Im Folgenden wird auf die Problematik der Rauheitsbeschreibung nicht weiter eingegangen. Vielmehr wird hier die systematische Toleranzierung von Abweichungen für verschiedene Rauheitsmodelle untersucht.

3 Simulation häufiger Fertigungsfehler bei additiver Fertigung

Bei additiver Fertigung treten einerseits *Rillen* mit fester Ortsfrequenz, andererseits mehr oder minder stochastische *Oberflächenrauheit* als häufige Fertigungsfehler auf. Beide können parametrisiert und im Sinne der systematischen Toleranzierung in der Simulation untersucht werden.

Dies wird im Folgenden für ein Modellsystem gezeigt, das sich an ein optisches System für ein LED-Signal- oder Hindernisfeuer anlehnt, ohne dabei einer konkreten Norm zu entsprechen. Eine Freiformlinse erzeugt die Lichtstärkeverteilung im Fernfeld, wo in Abhängigkeit vom Winkel zur Vertikalen Minimal- und Maximalwerte eingehalten werden

müssen. Im vertikalen Winkelbereich $\pm 5^\circ$ ist eine minimale Lichtstärke von mindestens 40 cd zu erreichen; dieser Wert wird in den folgenden Toleranzbetrachtungen als optische Funktionskennzahl untersucht.

Rillen können als sinusförmige Abweichungen mit Amplitude $A \sim R_q$ und fester Ortsfrequenz f parametrisiert werden. Eine Variation beider Parameter in der Simulation ergibt wie erwartet eine Korrelation der optischen Funktionskennzahlen mit dem Neigungsfehler $R_q \cdot f$ (vgl. Abbildung 1) über einen weiten Ortsfrequenzbereich.

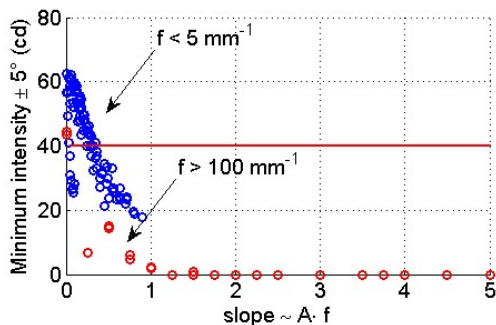


Abb. 1 Abhängigkeit der minimalen Lichtstärke vom Neigungsfehler $R_q \cdot f$ für eine sinusförmige Abweichung.

Stochastische Oberflächenabweichungen können durch Modelle mit unterschiedlichem Ortsfrequenzspektrum beschrieben werden. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um zufällige Abweichungen auf der Oberfläche mit Gaußscher Verteilung mit Mittelwert R_q und Korrelationslänge $\ell \sim \frac{1}{f}$. f kann als die typische Ortsfrequenz gesehen werden. Für den mittleren Neigungsfehler gilt dann $\langle m \rangle \sim R_q \cdot f$. Werden R_q und f in der Simulation variiert, so ergibt sich (vgl. Abbildung 2) ebenfalls eine, wenn auch schwach ausgeprägte, Korrelation der optischen Funktion mit dem Neigungsfehler.

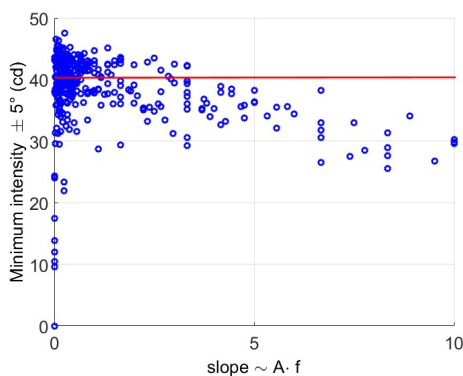


Abb. 2 Abhängigkeit der minimalen Lichtstärke vom Neigungsfehler $R_q \cdot f$ für eine stochastische Abweichung mit Gaußförmiger Abweichungsverteilung.

Dieses Modell der Oberflächenrauheit ist allerdings nicht sonderlich realistisch; bei additiver Fertigung ergeben sich zumeist deutlich komple-

xere Ortsfrequenzspektren. Bereits die Betrachtung einer *uniformen* statt Gaußverteilter stochastischen Abweichung (vgl. Abbildung 3) zeigt, dass hier die Betrachtung der Neigungsabweichung nicht genügt: sie ist nicht mit der optischen Funktion korreliert. Hier sind also genauere Untersuchungen der Abhängigkeit der optischen Funktion von anderen Parametern notwendig.

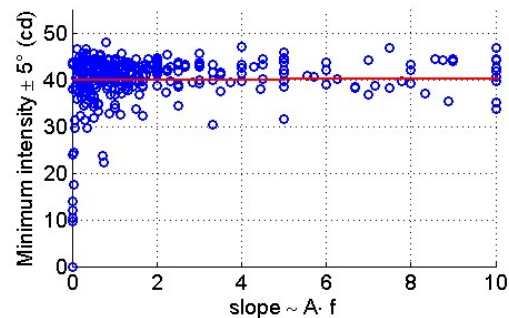


Abb. 3 Abhängigkeit der minimalen Lichtstärke vom Neigungsfehler $R_q \cdot f$ für eine stochastische Abweichung mit uniformer Abweichungsverteilung.

4 Fazit

Im Rahmen einer Toleranzanalyse können sowohl Rillen als auch Oberflächenrauheit als häufige Fertigungsfehler bei additiver Fertigung simuliert und systematisch untersucht werden. Hierfür erfolgt die Modellierung entweder mit fester Frequenz oder stochastisch mit unterschiedlichen Verteilungen. Während bei Rillen der Neigungsfehler mit optischen Funktionskennzahlen korreliert ist, zeigt sich bei Oberflächenrauheit, dass dieser Wert allein nicht genügt, um die optische Funktion zu beurteilen. Hier ist die Betrachtung weiterer Parameter erforderlich.

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).
- [4] J. Unterhinninghofen, Y. Özcan und A. Hofmann, "Systematische Toleranzierung von additiv oder replikativ gefertigten Freiformflächen," *Proc. DGaO* p. B20 (2018).
- [5] J. Stover, "Optical scattering, measurement and analysis," SPIE Press (2012).