

Toleranzen in der Beleuchtungsoptik: Freiformflächen, Arrays und 10 Millionen Strahlen

Angelika Hofmann, Simon Junginger, Andreas Timinger

OEC AG, München

<mailto:hofmann@oec.net>

Moderne Beleuchtungssysteme beinhalten oft komplexe Elemente wie z.B. Freiformflächen und Arrays. Diese stellen die Toleranzrechnung vor besondere Herausforderungen. Wir stellen einen Ansatz zur Monte Carlo-Toleranzrechnung von Beleuchtungssystemen vor, der reale Toleranzen berücksichtigt und klare Zielvorgaben für die Fertigung definiert.

1 Einführung

Erst die Kenntnis von Fertigungs- und Montagetoleranzen sowie deren Berücksichtigung bereits im Optikdesign erlaubt es, eine sinnvolle Balance zwischen Kosten und Qualitätsanforderungen zu finden. Sie ist damit wesentlich für den wirtschaftlichen Erfolg einer Entwicklung.

Einige Besonderheiten der Beleuchtungsoptik im Vergleich zur abbildenden Optik stellen die Toleranzrechnung jedoch vor Herausforderungen. Ein großer Unterschied besteht in der kaum vorhandenen Standardisierung - sowohl für die Beschreibung der optischen Elemente und deren Abweichungen als auch für die verwendeten Gütekriterien. Zudem erschweren lange Rechenzeiten auf Grund von nichtsequentiellen Pfaden sowie der Vielzahl der Freiheitsgrade die Toleranzrechnung.

Für diese Aufgabe haben wir eine weitgehend automatisierte Monte Carlo-Toleranzrechnung implementiert, deren Bestandteile in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

2 Komponenten – Freiformoptiken

Freiformoptiken sind in der Beleuchtungsoptik weit verbreitet, gelegentlich kommen sie auch in abbildenden Systemen zum Einsatz. Als geeignete Designmethode hierfür setzen wir das Maßschneiden der Optikfläche(n) durch Lösen der zu Grunde liegenden Differentialgleichungen ein [1]; die Beschreibung der Flächen erfolgt dann mittels NURBS. Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Standard-Optikkomponenten sind die zu erwartenden Toleranzen hier stark fertigungsabhängig (häufig kommen Spritzgussverfahren zum Einsatz).

3 Gütekriterien

Gütekriterien können die Effizienz eines Systems oder das Erreichen einer vorgegebenen Lichtverteilung – z.B. Homogenität – darstellen. Für manche Anwendungen sind dabei zu erfüllende Standards eindeutig definiert; diese geben z.B. die

Beleuchtungsstärke an Testpunkten, die Leuchtdichte oder Blendwerte vor. Exemplarisch für diese Anwendungsklasse sei hier die Straßenbeleuchtung genannt.

Für andere Anwendungen existieren hingegen keinerlei Standards, die Güte muss in diesem Fall vom oder mit dem jeweiligen Kunden individuell festgelegt werden. Beispiele hierfür sind die Allgemein- sowie Architekturbeleuchtung, bei der hauptsächlich ästhetische Anforderungen in messbare, photometrische Kennzahlen übersetzt werden müssen.

4 Toleranzen

Neben den Form- und Lagefehlern der Optik(en) müssen in der Beleuchtungsoptik auch die Toleranzen der Lichtquelle berücksichtigt werden.

Da die zu erwartenden Abweichungen der Optik(en) in Form und Größe stark vom konkreten Fertigungsprozess abhängen, ist hier eine enge Absprache mit dem Fertiger notwendig. Einige typische Fehler sind in Abb. 1 dargestellt: Rillen (periodische Fehler), Einsackungen oder Dellen und Keilfehler durch Schließfehler des Werkzeugs.

Werden rotationssymmetrische Flächen mittels Replikationsverfahren hergestellt, so treten dabei nichtsymmetrische Fehler auf. Dadurch müssen die fehlerbehafteten Flächen ebenfalls als Freiformflächen dargestellt werden.

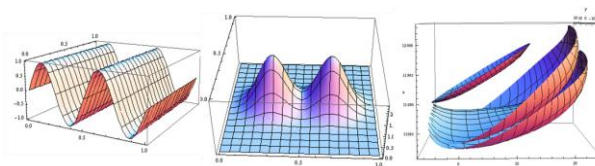


Abb. 1 Typische Fehlerbilder (von links nach rechts): periodische Fehler, Dellen, Schließfehler.

Für die Toleranzrechnung parametrisieren wir zunächst die zu berücksichtigenden Formfehler und überlagern sie dann den als NURBS-Flächen dargestellten Optikflächen (vgl. Abb. 2).

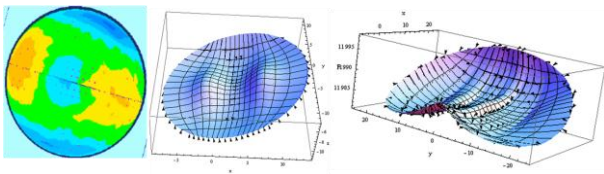


Abb. 2 Freiformflächen mit überlagerten Formfehlern: gemessenes Fehlerbild (links), Dellen (Mitte), periodischer Fehler.

5 Toleranzrechnung und Analyse

Sodann erfolgt eine Monte Carlo-Simulation von in der Regel mehreren tausend gestörten Systemen; das für Beleuchtungssysteme notwendige Monte Carlo-Raytracing der einzelnen Systeme wird mit LightTools durchgeführt und dann deren jeweilige Güte analysiert.

Auf diese Art und Weise können zum Einen die Auswirkungen und Korrelationen einzelner Toleranzen bestimmt werden. Abb. 3 zeigt eine solche Analyse am Beispiel einer periodischen Abweichung auf der totalreflektierenden Fläche einer Freiform-TIR-Linse. Trägt man die normierte Güte über der Amplitude, der Frequenz sowie dem maximalen Neigungsfehler auf, so ist nur im letzten Fall eine gute Korrelation zu erkennen.

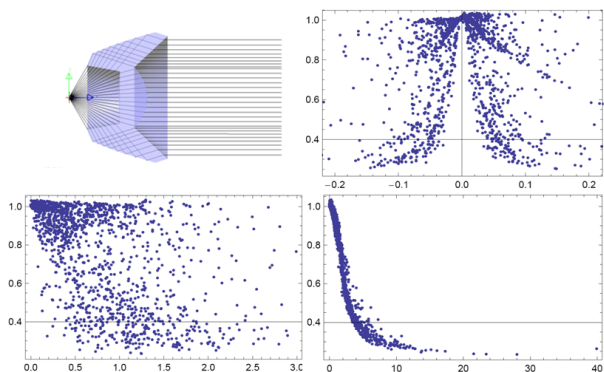


Abb. 3 Freiform-TIR-Linse und normierte Güte über Amplitude, Frequenz, maximalem Neigungsfehler (von links oben nach rechts unten).

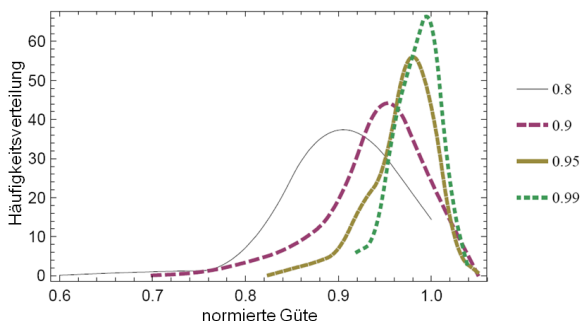


Abb. 4 Häufigkeitsverteilung über der normierten Güte für verschiedene Qualitätsklassen.

Zum Anderen erlaubt diese Methode auch die Berechnung von Häufigkeitsverteilungen wie sie in Abb. 4 dargestellt sind. Somit können Toleranzgrenzen festgelegt werden und verschiedene Qua-

litätsklassen mit unterschiedlich engen Fertigungstoleranzen definiert werden.

6 Modularität

Besonders LED-Systeme sind häufig modular aufgebaut, ein Beispiel ist in Abb. 5 gezeigt. Durch die Kombination identischer Einzelsysteme können sich die Einzeltoleranzen ver- oder entschärfen, eine Toleranzrechnung unter Berücksichtigung aller Einzelparameter wäre jedoch sehr zeitaufwändig. Stattdessen können die Ergebnisse der Simulation der Einzelsysteme mathematisch überlagert werden. Dies erlaubt dann eine Analyse des Gesamtsystems.



Abb. 5 Modulares System: Straßenleuchte.

7 Fazit

Einerseits ist eine Toleranzrechnung für Beleuchtungsoptik wichtig für die Abwägung von Kosten und Qualitätsanforderungen, andererseits auf Grund einiger Besonderheiten im Gegensatz zur abbildenden Optik aber auch sehr aufwändig. Zudem existiert bislang nur wenig Standardisierung in diesem Bereich. Für die Charakterisierung der zu erwartenden Formabweichungen ist daher eine enge Zusammenarbeit mit dem Fertiger nötig. Erwartungsgemäß erweisen sich dabei Neigungsfehler oft als bestimmend für die optische Güte.

Wir haben eine Monte Carlo-Toleranzrechnung der Montage- und Fertigungstoleranzen für Freiformflächen implementiert. Diese ist weitgehend automatisiert, so dass der menschliche Arbeitsaufwand deutlich kleiner als die nötige Rechenzeit ist. Erst diese Automatisierung erlaubt uns die routinemäßige Durchführung von Toleranzrechnungen für Beleuchtungssysteme.

Literatur

- [1] H. Ries et al., „Tailored freeform optical surfaces“, *J. Opt. Soc. Am. A* **19**(3), 590-595 (2002)