

METHODIK ZUR KOSTENBASIERTEN TOLERANZBUDGETFESTLEGUNG OPTOMECHANISCHER SYSTEME

N.Grubert*, G.König*, J. Stollenwerk*,**, P.Loosen*,**

*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen University

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

<mailto:nicole.grubert@tos.rwth-aachen.de>

Die Festlegung von Fertigungstoleranzen optomechanischer Systeme wird oftmals mithilfe einer Toleranzanalyse durchgeführt. Ansätze zum systematischen Vorgehen existieren, gewährleisten aber nicht das Erreichen des bestmöglichen Toleranzbudgets. Dieses Paper stellt eine kostenbasierte Methodik vor, die unter Einbeziehung des Kosten-Nutzens eine Toleranzbudgetfestlegung ermöglicht.

1 Motivation

Der Fokus bei der Auslegung eines optischen Systems liegt heute neben der Einhaltung der geforderten Spezifikationen zunehmend auf einer möglichst wirtschaftlichen Fertigung der optomechanischen Komponenten. In einer optischen Entwicklungsumgebung stehen hierzu verschiedene Toleranzanalysen zur Verfügung. Zwei Toleranzanalysen sind die Monte-Carlo-Analyse und die Sensitivitätsanalyse. Bei der Monte-Carlo-Analyse wird eine gewählte Anzahl an toleranzbehafteten Systemen generiert. Die Werte der einzelnen Toleranzen variieren in ihren zuvor definierten Toleranzfeldern. Hierbei nehmen die Toleranzwerte gemäß einer Wahrscheinlichkeitsverteilung (z.B. Gauß-Verteilung) in dem jeweiligen Toleranzfeld an. Der Vorteil dieser Analyse ist die gleichzeitige Betrachtung mehrerer zufällig zusammenwirkender Toleranzen. Mithilfe der Ergebnisse der Analyse kann abgeschätzt werden, wie viele dieser zufälligen toleranzbehafteten Systeme die Restriktionen an das optische System erfüllen. Die Monte-Carlo-Analyse ist somit ein Werkzeug zur Überprüfung der optischen Qualität des Gesamtsystems, erlaubt jedoch nicht die unmittelbare Festlegung des Toleranzbudgets. Im Gegensatz zur Monte-Carlo-Analyse werden bei der Sensitivitätsanalyse nur die einzelnen Toleranzen und deren Einfluss auf die optische Qualität betrachtet. Dies ermöglicht die gesonderte Identifikation von kritischen Toleranzen. Kleine Positionsänderungen einer kritischen Komponente können die optische Qualität maßgeblich mindern. An dieser Stelle findet oftmals eine sukzessive Festsetzung der Toleranzen statt, indem immer das Toleranzfeld der empfindlichsten Toleranz verkleinert wird [1]. Bei einer derartigen Toleranzbudgetfestlegung werden zum einen oftmals zu hohe Toleranzvorgaben für die Fertigung festgelegt, da die Toleranzfeldbreite zu gering ist und nicht gefertigt werden kann. Zum anderen führt eine solche Vorgehensweise zu einem übermäßigen Anstieg der Fertigungskosten, falls

Toleranzen enger gesetzt werden als erforderlich [2]. In Hinblick auf eine wirtschaftliche Fertigung und Einhaltung der optischen Qualität des Systems kann mit diesen Methoden kein optimales Toleranzbudget festgelegt werden. Ein anderer Ansatz, der die Kosten bei der Toleranzierung berücksichtigt, basiert auf einer Kostenfunktion [3], welche die gegenläufigen Interessen Fertigungskosten und optische Qualität eines optischen Systems berücksichtigt. Nachteilig ist, dass die Kostenfunktion mühsam aufgestellt und zahlreiche Parameter, wie z.B. für die Fertigung oder Gewichtungen für die einzelnen Faktoren, definiert werden müssen. Darüber hinaus wird das Ergebnis somit maßgeblich von der Erfahrung des Optikdesigners beeinflusst.

2 Methodik zur Toleranzbudgetfestlegung

Ausgangspunkt der neuentwickelten Methodik ist ein Toleranzbudget der Optomechanik nach den Allgmeintoleranzen nach DIN ISO 2768-mK. In Abb. 1 sind die Toleranzfeldbreiten der jeweiligen Toleranz T_a bis T_h dargestellt.

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768-mK	T_a	T_b	T_c	T_d	T_e	T_f	T_g	T_h
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Abb. 1 Die Startwerte für die Toleranzfestlegung sind die Allgmeintoleranzen nach DIN ISO 2768-mK.

Die Allgmeintoleranzen beschreiben ein einzuhaltendes Toleranzbudget für die Fertigung. Ausgehend von den Allgmeintoleranzen wird mithilfe der Sensitivitätsanalyse der Einfluss auf die optische Qualität jeder Toleranz des Systems betrachtet. Bei der Festsetzung wird zwischen Kosten und Nutzen abgewogen. Beim ersten Schritt der Toleranzbudgetfestlegung befinden sich alle Toleranzen auf demselben Toleranzniveau, den Allgmeintoleranzen. Der Anstieg der Fertigungskosten durch die Verkleinerung des Toleranzfeldes einer beliebigen Toleranz ist auf diesem Toleranzniveau für alle Toleranzen gleich.

Der Einfluss auf die optische Qualität Q_i wird in der Regel zwischen den einzelnen Toleranzen variieren, wie in Abb. 3 dargestellt ist.

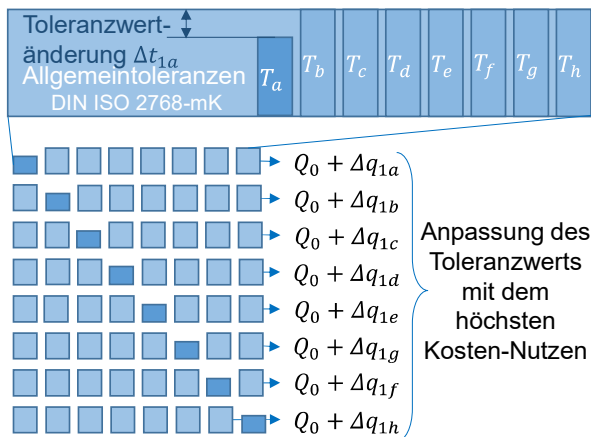


Abb. 2 Bei einem Iterationsschritt werden die Fertigungstoleranzen um Δt_{ji} verändert. Dabei wird stets nur eine Toleranz relativ zu den anderen Toleranzen verändert. Dabei entstehen Systeme mit unterschiedlicher optischer Qualität, die miteinander verglichen werden.

Daraus folgt, dass das Toleranzfeld der sensitivsten Toleranz im ersten Schritt verkleinert wird. Im nächsten Schritt der sukzessiven Toleranzbudgetfestlegung befindet sich die Toleranz mit verkleinerter Toleranzfeldbreite nicht mehr auf demselben Toleranzniveau wie die übrigen Toleranzen. Sollte in diesem Schritt erneut die Toleranzfeldbreite dieser Toleranz verkleinert werden, so kann nicht mehr von einem gleichbleibenden Kostenanstieg ausgegangen werden. Um die Verringerung der Toleranzfelder der Toleranzen mit dem besten Kosten-Nutzenverhältnis zu identifizieren, werden im nächsten Schritt die Kosten und der Nutzen einer Verringerung der Toleranzfeldbreite von mindestens zwei weiteren, weniger sensitiven Toleranzen betrachtet, siehe Abb. 3.

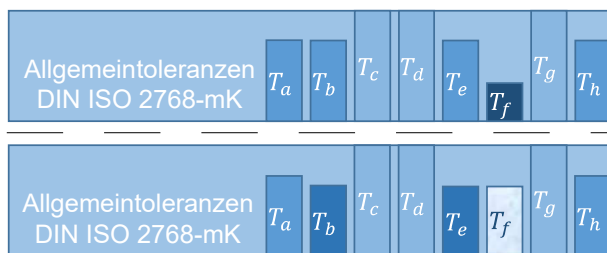


Abb. 3 Das höchste Verbesserungspotential bei dieser Toleranzbudgetverteilung hat die Toleranz T_f . Zugleich befindet sich T_f auf dem höchsten Toleranzniveau im Vergleich zu allen anderen Toleranzen. Die Anpassung der Toleranz T_f wird mit der Anpassung von Toleranz T_b und T_e verglichen.

Hierbei werden die entstehenden Fertigungskosten bei der Verkleinerung der Toleranzfelder der weniger sensitiven Toleranzen kumuliert und mit den Fertigungskosten für die Verkleinerung der

Toleranzfeldbreite der sensitivsten Toleranzen verglichen. Zusätzlich wird der kumulierte Einfluss der weniger sensitiven Toleranzen auf die optische Qualität betrachtet und ebenfalls mit dem Einfluss der sensitivsten Toleranz verglichen. Weitere Einflüsse anderer Toleranzen auf demselben Toleranzniveau werden kumuliert, bis der gleiche Einfluss der sensitivsten Toleranz erreicht ist. Sollten beim Erreichen dieses Qualitätswertes die kumulierten Fertigungskosten der weniger sensitiven Toleranzen unter den Fertigungskosten der sensitivsten Toleranz liegen, so werden beim Toleranzbudget die weniger sensitiven Toleranzen angepasst. Im Falle einer Überschreitung der Fertigungskosten der sensitivsten Toleranz oder eines Nichterreichens des Qualitätswertes, wird die Toleranzfeldbreite der sensitivsten Toleranz erneut verkleinert. Dieser Schritt wird wiederholt, bis die Zielqualität erreicht ist.

3 Zusammenfassung

Die Methodik berücksichtigt den Einfluss einzelner Bauteiltoleranzen auf die optische Qualität sowie den direkten Zusammenhang zwischen Bauteiltoleranzen und deren Fertigungskosten. Hierbei findet eine sukzessive Festlegung des Toleranzbudgets durch eine Abwägung des Kosten-Nutzenverhältnisses der Bauteiltoleranzen statt. Bei jedem Schritt der Toleranzbudgetfestlegung wird das Kosten-Nutzenverhältnis bei der Verringerung der Toleranzfeldbreite der sensitivsten Toleranz dem Kosten-Nutzenverhältnis mindestens zweier weniger sensiblen Toleranzen gegenübergestellt.

4 Ausblick

In Hinblick auf die Effizienz und Kostenreduktion bei der Entwicklung optischer Systeme hat die Automatisierbarkeit von Prozessen eine stetig wachsende Bedeutung. Hierzu soll die neue Methodik in weiteren Arbeiten in einen Algorithmus implementiert werden, welcher die Toleranzstapelanalyse einer CAD-Software mit der Toleranzanalyse einer optischen Entwicklungsumgebung koppelt. Diese Kopplung bereitet den Weg für eine vollständige Automatisierung der Festlegung des Toleranzbudgets eines optischen Systems.

5 Literatur

- [1] Ginsberg, R. H., *Outline of tolerancing. from performance specification to toleranced drawings*, (Optical Engineering 20(2)), 175–180 (1981)
- [2] R. N. Youngworth, *Twenty-first century optical tolerancing: a look at the past and improvements for the future in International Optical Design Conference 2006*, (SPIE), (2006).
- [3] Willey, R., George, R., Odell, J. and Nelson, W., *Minimized Cost Through Optimized Tolerance Distribution In Optical Assemblies*, (SPIE Proceedings), 12–17 (1983)