

Modellgestützte Rekonstruktion der Lage von dezentrierten Linsen in optischen Systemen

H. Gilbergs*, K. Frenner*, P. Eberhard**, W. Osten*

* Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

** Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart

holger.gilbergs@ito.uni-stuttgart.de

Hochleistungsoptiken setzen eine genaue Positionierung der optischen Elemente voraus. Fehlstellungen können die Abbildungsqualität deutlich verschlechtern. Eine modellbasierte Rekonstruktion der Dezentrierungen der optischen Elemente infolge thermischer und mechanischer betriebsbedingter Beanspruchungen würde eine adaptive Korrektur des Systems ermöglichen.

1 Einführung

Optische Hochleistungssysteme, wie Lithographieobjektive, stellen sehr hohe Anforderungen an die Verarbeitung und Justierung der optischen Komponenten. Bereits kleine Fehler im Strahlengang können die Abbildungsqualität verringern und damit die Ausbeute an funktionstüchtigen Chips beeinträchtigen. Abbildung 1 zeigt ein solches Objektiv und den Wellenfrontfehler für eine Punktlichtquelle in der Maskenebene auf der optischen Achse.

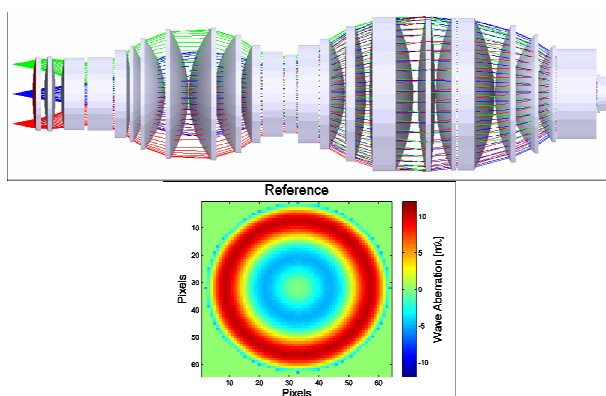


Abb. 1 Lithographieobjektiv [1] aus der 248 nm Generation mit Wellenfrontfehler einer abgebildeten Punktlichtquelle auf der optischen Achse.

Verschiebungen der optischen Elemente des Systems führen zu zusätzlichen Fehlern in der Wellenfront. Diese sollen zur Rekonstruktion der Abweichungen der Linsen von der idealen Lage herangezogen werden. Das hier verwendete Verfahren wird in der Literatur [2] bereits beschrieben. Es ist jedoch geplant, diesen Ansatz auf mechanisch-optische Simulationen auszuweiten, um umfangreichere Rekonstruktionen zu ermöglichen.

2 Linearisierung der Wellenfrontfehler

Für die Auswertung der Lage der Linsen wurde der Einfluss von Linsenverschiebungen auf die Wellen-

fronten, die von Punktlichtquellen in der Maskenebene ausgehen, betrachtet. Ein gutes, beugungsbegrenztes optisches System erreicht Wellenfrontfehler, deren RMS Wert im Bereich einiger tausendstel Wellenlängen liegt (siehe Abb. 1).

Der Wellenfrontfehler des ungestörten Systems wurde im Folgenden als Referenz genutzt. Für die Rekonstruktion interessant ist nur der Teil des Wellenfrontfehlers, der durch die Störung im System hervorgerufen wird (Abb. 2).

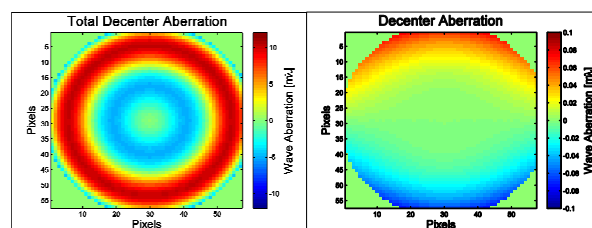


Abb. 2 Links: Simulierter Wellenfrontfehler eines gestörten Systems (eine Linse 10 nm von der opt. Achse verschoben). Rechts: Gestörte Wellenfront, abzüglich des intrinsischen Wellenfrontfehlers des Systems (s. Abb. 1)

Da eine lineare Beschreibung des Problems vorteilhaft für die Auswertung ist, wurde versucht, den gesamten Wellenfrontfehler des Objektivs als Linearkombination der Wellenfrontfehler einzelner Linsenverschiebungen darzustellen.

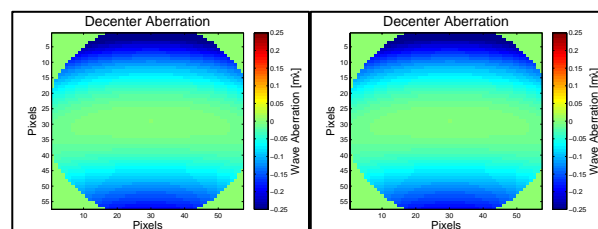


Abb. 3 Links: Simulierter Wellenfrontfehler eines gestörten Systems (Referenz bereits abgezogen). Rechts: Der Wellenfrontfehler des gleichen Systems als Linearkombination der Wellenfrontfehler der Verschiebungen einzelner Linsen.

Dazu wurde jeweils eine Linse des Systems von der Achse weg verschoben, der Rest des Systems blieb ungestört. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich zwischen einem Wellenfrontfehler, der direkt durch Raytracing berechnet wurde, und einem, der durch Linearkombination erstellt wurde. Die Wellenfrontfehler weichen kaum voneinander ab, die Beschreibung als Linearkombination erscheint daher, zumindest für kleine Auslenkungen der Linsen, gerechtfertigt.

3 Regularisierung

Die Rekonstruktion der genauen Lage der Linsen, die einen bestimmten Wellenfrontfehler erzeugt, ist ein inverses, bzw. schlecht gestelltes Problem [2]. Da das Problem eine lineare Beschreibung besitzt, bietet sich zur Lösung die Tikhonov-Regularisierung an. Dazu wird folgendes Funktional minimiert:

$$\|Ax - b\|_P^2 + \|x - x_0\|_Q^2 \quad (1)$$

Wobei b der gemessene Wellenfrontfehler, x der Vektor mit den gesuchten Verschiebungen, x_0 ein Anfangsschätzwert bzw. a-priori Information über die Lösung und P und Q die invertierten Kovarianzmatrizen von b und x_0 sind. Der Ausdruck

$$\|\dots\|_X^2 \quad (2)$$

stellt hierbei die gewichtete L_2 Norm dar.

Es existiert eine analytische Lösung für lineare Systeme, die für einen gegebenen Effekt (Wellenfrontfehler) die wahrscheinlichste Ursache (Linsenlage) liefert.

$$x = x_0 + (A^T P A + Q)^{-1} A^T P (b - Ax_0) \quad (3)$$

4 Ergebnisse

Zur Demonstration der Rekonstruktionsmethode wurden Simulationen an dem in Abb. 1 gezeigten Lithographieobjektiv durchgeführt. Jede Linse kann senkrecht zur optischen Achse verschoben werden, wobei die Verschiebungsvektoren in einer Ebene liegen und in die gleiche Richtung zeigen. Es wurden nun zufällige Auslenkungskombinationen generiert. Die Zufallsverteilung war dabei eine Gauß-Verteilung mit dem Schwerpunkt um eine Auslenkung von 5 nm. Da die Verschiebungsvektoren in die gleiche Richtung zeigen sollten, wurden Auslenkungen kleiner 0 als perfekt zentrierte Linse gewertet, also aufgerundet.

Für das so generierte gestörte Objektiv wurden dann die Wellenfrontfehler mittels Raytracing (Zemax) berechnet. Die Rekonstruktion durch den Regularisierungs-Ansatz wurde in Matlab durchgeführt. Für die a-priori Information x_0 wurde als mittlere Auslenkung das Zenrum der Zufallsverteilung, also 5 nm, angenommen. Die Basis der Wellen-

frontfehler wurde für Einzelauslenkungen der Linsen von 100 nm berechnet. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer solchen Rekonstruktion.

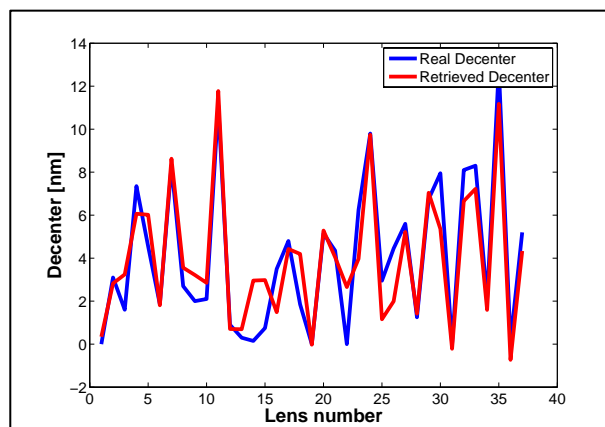


Abb. 4 Blau: Tatsächliche Auslenkungen der Linsen. Rot: Rekonstruktion der Auslenkungen anhand der Wellenfrontfehler des Gesamtsystems.

Obwohl das Objektiv sehr komplex ist (38 Linsen), ermöglicht die gezeigte Methode eine qualitative Rekonstruktion der Dezentrierungen der Linsen. Für eine genauere Rekonstruktion wäre es vorteilhaft noch mehr Informationen über den Systemzustand zu sammeln und auszuwerten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten, rein optischen Methoden sind vielversprechend. Allerdings ist zu erwarten, dass es für Probleme mit mehr Freiheitsgraden, beispielsweise für Verkippung und axiale Verschiebungen oder Deformationen der optischen Elemente durch äußere Kräfte und Wärmeausdehnung vorteilhaft wäre, noch mehr Informationen über das System zu berücksichtigen.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische und Numerische Mechanik wird derzeit an einer Simulationsumgebung gearbeitet, die zusätzlich zu den optischen Simulationen, mechanische Simulationen durch Finite Elemente Methoden durchführen und zur Informationsgewinnung verwerten kann. Hierbei wird weiterhin besonderes Augenmerk auf die Rekonstruktion des Systems gelegt.

Die Autoren danken der Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projekts im Rahmen des Exzellenzclusters Simulation Technology (EXC 310/1) an der Universität Stuttgart.

Literatur

- [1] US Patent 6,522,484 B1
- [2] US Patent 5,420,436
- [3] J. Hadamard, "Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique." Princeton University Bulletin, 49–52 (1902)