

Simulation und Formprüfung von Phasenplatten für fokusinvariante Systeme

T. Hellmuth, S. Rathgeb, F. Holzwarth

Fachhochschule Aalen

[mailto: thomas.hellmuth@fh-aalen.de](mailto:thomas.hellmuth@fh-aalen.de)

Um den Einfluss der Oberflächenform von kubischen Phasenplatten, wie sie in einem kommerziellen Mikroskop eingesetzt werden, zu untersuchen, wurden diese mit Hilfe eines konfokalen optischen Topografiemessgeräts vermessen. Mit den so gewonnenen Zernikekoeffizienten der Oberfläche wurde die Punktbildfunktion simuliert. Die Ergebnisse wurden mit Punktbildern verglichen, welche mit einem Mikroskop und der vermessenen Phasenplatte gewonnen wurden.

1 Problemstellung

Die Schärfentiefe von optischen Systemen wie beispielsweise Mikroskopen kann man verbessern, wenn man eine Phasenplatte mit kubischer Oberflächenfunktion des Typs $f(x,y) = x^3+y^3$ in die Austrittspupille des optischen Systems bringt. Man erhält eine OTF, die sich bei Defokussierung kaum ändert. Man kann daher für die Rückfaltung ein einheitliches inverses Filter benutzen, um so von einem dreidimensional ausgedehnten Objekt ein Bild mit hoher Schärfentiefe zu erhalten [1].

Die Form realer kubischer Phasenmasken, wie sie in kommerziellen Mikroskopen eingesetzt werden, weichen aufgrund von Fertigungstoleranzen von der mathematischen Form ab. Außerdem führen mechanische Toleranzen der Fassung zu Lagetoleranzen im Mikroskop. Dadurch entstehen Artefakte bei der Bildrekonstruktion. Kennt man jedoch die tatsächliche Form und die Einbaulage der Phasenmaske, kann man diese Daten benutzen, um ein inverses Filter durch Simulation gezielt zu modellieren. Ziel der hier dargestellten Untersuchung ist deshalb, die Form einer realen Phasenmaske zu vermessen und unter Verwendung der optischen Daten der Mikroskopoptik die Punktbildfunktion zu simulieren. Die Güte der Simulation wird mit der gemessenen Punktbildfunktion verglichen.

2 Methode und Ergebnisse

Die Oberflächen der kubischen Phasenplatte wurden mit dem optischen Topografiemessgerät „MicroProf“ der Firma FRT Fries Research + Technology, Bergisch Gladbach vermessen.

Messprinzip: Die Probe wird mit einem x-y-Tisch unter einem optischen Abstandssensor zeilenweise verfahren und mit einem konfokalen Weißlichtsensor, der auf der Basis chromatischer Längs-

aberration der Fokussieroptik arbeitet, vermessen. Die Messauflösung des Sensors beträgt 10 nm. Abbildung 1 zeigt die kubische Fläche der Phasenmaske. Der im Mikroskop genutzte Ausschnitt der Phasenplatte ist ein Quadrat mit 5 mm Seitenlänge.

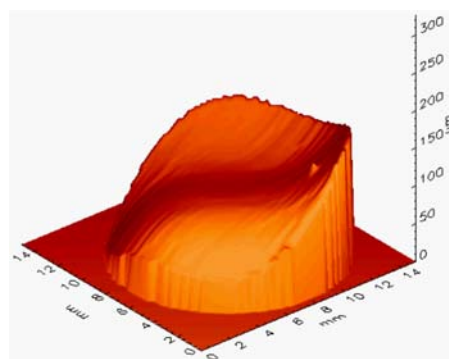


Abb.1 Oberfläche der Phasenplatte

Aus den Messdaten werden die Zernikekoeffizienten durch lineare Regression ermittelt. Die Standardabweichung des Messfehlers pro Messpunkt, der auf Tischungenauigkeiten, Vibrationen etc. zurückzuführen ist, beträgt 0.28 μm . Daraus ergibt sich ein Fehler von weniger als 0.02 μm für die einzelnen Zernikekoeffizienten.

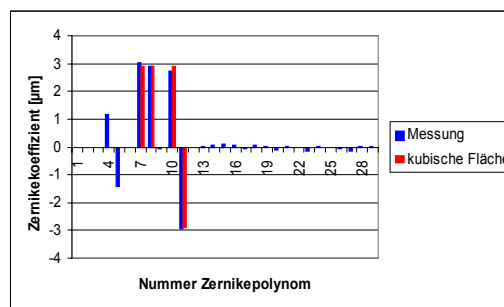


Abb. 2 Zernikekoeffizienten der gemessenen Fläche im Vergleich zur idealen kubischen Fläche. Die Nummerierung entspricht der von ZEMAX.

Abbildung 2 zeigt die aus der Messung ermittelten Zernikekoeffizienten im Vergleich zu den Sollwerten, die sich aus dem theoretischen Verlauf einer kubischen Phasenplatte ergeben. Die aus der Vermessung der Oberfläche der Phasenplatte gewonnenen Zernikekoeffizienten werden zusammen mit den optischen Daten des Mikroskopobjektivs Zeiss 63/1.4 dazu verwendet, um mit ZEMAX die Punktbildfunktion des Gesamtsystems zu simulieren. Um die tatsächliche Lage der Phasenplatte relativ zur Objektivpupille zu bestimmen, wurde mit Hilfe einer Bertrandlinse und einer CCD-Kamera die Aperturbblendenebene abgebildet. Dabei ergab sich, dass bei der verwendeten Phasenplatte aufgrund mechanischer Toleranzen die quadratische Fassung um 0.2 mm relativ zur Objektivapertur verschoben ist. Diese Dezentrierung wurde bei der Simulation berücksichtigt.

Die Punktbildfunktion wurde mit Hilfe einer hochauflösenden Zeiss Axiocam Mikroskopkamera aufgenommen (Durchlicht). Als Objekt wurden punktförmige Fehlstellen (Sternchen) in einer dünnen Silberschicht auf einem Objektträger verwendet. Abbildung 3 zeigt die Punktbilder ohne Phasenplatte. Die Defokussierungen wurden so gewählt, dass die Intensität im Zentrum einen Nulldurchgang hat. Die entsprechende Defokussierungseinstellung weicht in der Simulation weniger als 10% vom experimentellen Ergebnis ab.



Abb. 3 Gemessene Punktbildfunktion, fokussiert (Mitte), defokussiert (links, rechts), Objektiv Zeiss 63/1.4



Abb. 4 Punktbildfunktion mit Phasenplatte

Abbildung 4 zeigt das Punktbild mit Phasenplatte. In Abbildung 5 wird das simulierte Punktbild (Schnitt) mit dem gemessenen Punktbild verglichen. Die Dezentrierung der Phasenplatte um 0.2 mm wurde bei der Simulation berücksichtigt. Abb.6 zeigt den Vergleich der simulierten Punktbildfunktionen mit und ohne Dezentrierung. Das Ergebnis zeigt, dass die PSF empfindlich von der Dezentrierung abhängt.

3 Zusammenfassung

Simulation und experimentelle Aufnahme des Punktbildes stimmen innerhalb einer Toleranz der Zernikekoeffizienten von 0.2 μm überein.

Die Zernikekoeffizienten aus der Formvermessung der Phasenplatte sind zusammen mit den optischen Daten des Mikroskopobjektivs geeignet, das Punktbild zu simulieren, um daraus die für die Rückfaltung notwendige OTF des Systems durch Fouriertransformation zu bestimmen.

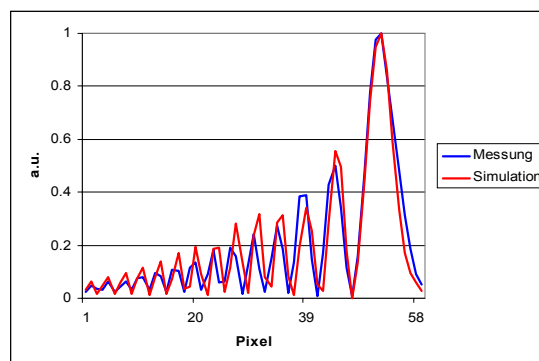


Abb.5 Vergleich Simulation/Messung (0.2mm dezentrierte Phasenmaske wie im Experiment)

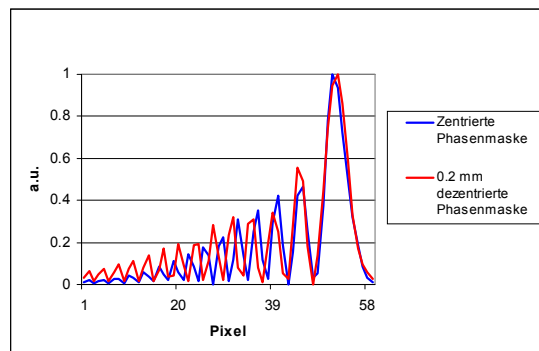


Abb.6 Vergleich PSF für zentrierte und um 0.2 mm dezentrierte Phasenmaske

Literatur

- [1] E.R. Dowski, W.T. Cathey, Appl. Opt., 34, 859-1866, (1995)
- [2] T. Hellmuth, S. Rathgeb, "Simulation of focus invariant optical systems" SPIE Proc. 5249, 62-70 (2004)

Projektförderung: Landesstiftung Baden-Württemberg