ilmedia

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Daniel Pätz, Sebastian Stoebenau, Stefan Sinzinger :

“Computational Imaging” zur Optimierung optischer Abbildungssysteme

Zuerst erschienen in:
DGaO-Proceedings. - Erlangen-Nürnberg : Dt. Gesellschaft für angewandte Optik, ISSN 1614-8436. - Bd. 109 (2008), B1, insg. 2 S.

URL: http://www.dgao-proceedings.de/download/109/109_b1.pdf

“Computational Imaging” zur Optimierung optischer Abbildungssysteme

D. Pätz, S. Stoebenau, S. Sinzinger

Technische Universität Ilmenau

mailto:daniel.paetz@tu-ilmenau.de

Durch eine definierte Phasenmodifizierung in optisch abbildenden Systeme (Wave front Coding) und digitale Nachverarbeitung des aufgenommenen Bildes lässt sich eine Vergrößerung der Schärfentiefe bei gleichbleibender Apertur erreichen. Es werden Design- und Fertigungsprozess einer refraktiven kubischen Phasenplatte sowie Experimente zur Punktabbildung beschrieben.

1 Einführung

In klassischen Anwendungen optischer Systeme ist das Hauptziel eine scharfe, punktförmige Objekt-Bild-Abbildung. Mit einer Vergrößerung der numerischen Apertur, wie sie für eine Vergrößerung des Auflösungsvermögens notwendig ist, nehmen jedoch die Schärfentiefe des Systems und damit die Bildqualität insbesondere von dreidimensionalen Objekten drastisch ab. Das sog. Wavefront coding (WFC) bietet eine Möglichkeit, die Schärfentiefe ohne wesentliche Verluste in Auflösung und Lichtintensität zu erhöhen [1]. Dabei wird durch ein Wellenfront formendes Phasenelement in der Aperturöffnung eine gezielte Veränderung der optischen Übertragungsfunktion durchgeführt und durch eine anschließende digitale Nachverarbeitung eine Bildqualität erreicht, die dem ideal fokussierten Bild sehr nahe kommt, dies jedoch in dem vergrößerten Schärfentiefebereich. Für den in Abb. 1 schematisch dargestellte Mikroskopaufbau mit einem 5x Objektiv (NA = 0,14) werden im Folgenden Designüberlegungen für das WFC und erste experimentelle Ergebnisse mit einer refraktiv wirkenden kubischen Phasenplatte präsentiert, die durch ein neuartiges Fertigungsverfahren hergestellt wurden.

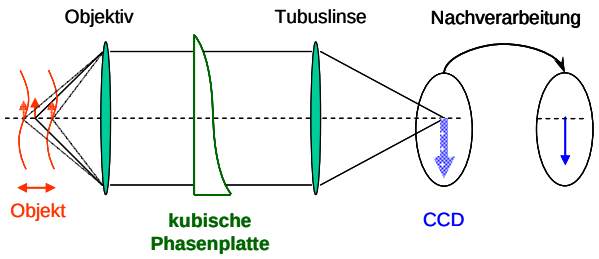

Abb. 1 *Mikroskopsystem (5x/0,14) mit WFC*

2 Prinzip des WFC

Beim WFC soll bei maximalem Auflösungsvermögen des Gesamtsystems eine möglichst hohe Invarianz gegenüber Defokussierung (Schärfentiefe) erreicht werden. Diese Forderungen an das Design eines phasenkodierenden Elementes lassen sich durch ein kubisches Profil der Form

$$z = \alpha \cdot \left(x^3 + y^3\right) \qquad (1)$$

realisieren [2]. Die wellenfrontkodierte Punktbildfunktion erzeugt damit bereits im fokussierten Fall ein unscharfes Bild, welches jedoch bei zunehmender Defokussierung nahezu erhalten bleibt. Durch eine Entfaltungsoperation lässt sich nach dem Abbildungsprozess durch digitale Nachverarbeitung der Einfluss der kubischen Phasenplatte herausfiltern.

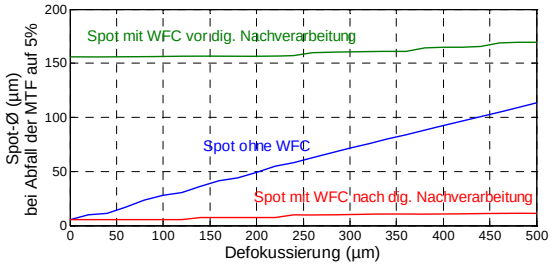

Abb. 2 *Spotqualitäten für Defokussierung bis 500 µm*

Abb. 2 zeigt die Simulationsverläufe der Spotdurchmesser bei 5% der maximalen Spotintensität für die defokussierten Punktbilder mit bzw. ohne WFC sowie die entfalteten Punktbilder über die Defokussierung, wobei die Qualität des entfalteten wellenfrontkodierten Spots über einen großen Bereich nahezu konstant bleibt.

3 Design einer optimalen Phasenplatte

Für eine geeignete Wahl des Parameters α, der nach Gl. (1) die Form der Phasenplatte bestimmt, muss ein Optimum zwischen der Schärfentiefe und dem Auflösungsvermögen gefunden werden. In Abb. 2a ist der sog. Hilbert space angle für unterschiedliche Parameter α über die Defokussierung aufgetragen. Dieser stellt einen Kennwert für die Unähnlichkeit zweier Funktionen dar. Je geringer der Hilbert space angle ist, desto größer ist die Ähnlichkeit zwischen fokussierter und defokussierter PSF [3]. Ein Punktbild mit großer Schärfentiefe

wird demnach nur mit hinreichend großen α erreicht. Mit zunehmendem α sinkt jedoch gleichzeitig die maximale Auflösung. Dies wird im MTF-Verlauf (Abb. 2b) in einem Abfall der Grenzfrequenz gegen null sichtbar und macht eine entsprechende digitale Nachverarbeitung unmöglich. Für das untersuchte System konnte ein optimaler Wert von α = 0.005 ermittelt werden.

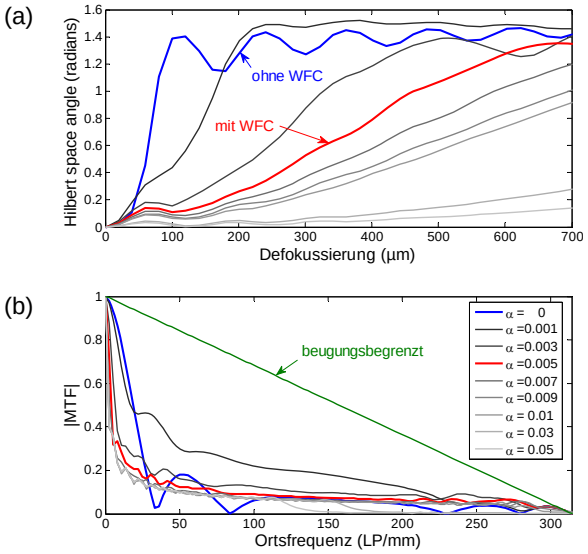

Abb. 3 ***(a)*** *Vergleich von fokussierter und defokussierter PSF mittels Hilbert space angle.* ***(b)*** *MTF-Verläufe defokussierter PSFs mit WFC*

4 Fertigung einer refraktiven Phasenplatte

Die Fertigung eines refraktiv wirkenden Phasenelementes erfolgte durch ein mikrozerspanendes Verfahren in PMMA. Zur vollen Ausleuchtung der quadratischen Apertur wurde das Profil auf 8 x 8 mm² mit einer maximalen Profiltiefe von ca. 40 µm gefertigt. Es wurden Rauhigkeiten von R_a < 27 nm und Formabweichungen kleiner 250 nm gemessen [4].

5 Simulationen und Experimente

Vor einer experimentellen Umsetzung des in Abb. 1 gezeigten Aufbaus, wurden Simulationen zur erforderlichen Positioniergenauigkeit der Phasenplatte bei einer Defokussierung von 200 µm durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Verschiebung der Phasenplatte aus der Aperturöffnung entlang der optischen Achse in einem Bereich von bis zu ca. 20 mm nur unwesentlichen

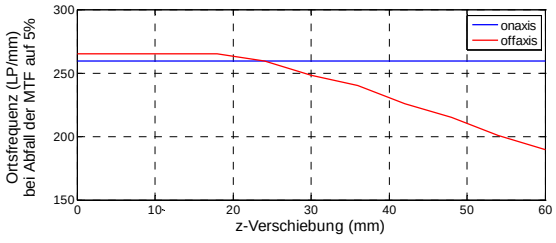

Abb. 4 *Abfall der Grenzauflösung bei axialer z-Verschiebung der Phasenplatte für onaxis/offaxis Abbildung*

Einfluss hat. Eine Verschiebung darüber hinaus führt zu einem Abfall der Auflösung des entfalteten Punktbildes für die Abbildung im Feld (Abb. 4).

Die experimentelle Umsetzung erfolgte mit einer LED-Beleuchtung (λ = 627nm) und einer 8 Bit CCD-Kamera mit (5.2 x 5.2) µm² Pixelgröße. Die aufgenommen Punktbilder sind in Abb. 5 zu sehen. Die Filterfunktion zur Nachverarbeitung wurde mit den im Experiment aufgenommenen fokussierten Punktbildern mit bzw. ohne WFC ermittelt.

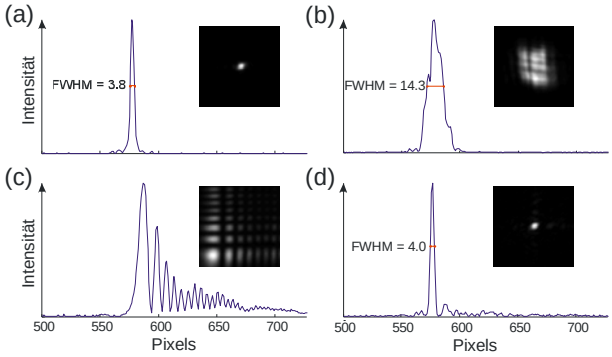

Abb. 5 *Punktbild bei bester Fokussierung (a), Defokussierung um 200 µm (b), Defokussierung mit WFC (c), nach digitaler Nachverarbeitung (d)*

Wie in Abb. 5a-d zu sehen, besitzt das nachverarbeitete Punktbild mit WFC im Vergleich zum fokussierten Punktbild annähernd gleiche FWHM. Das Rauschen, was auch in Abb. 5d sichtbar ist, führt jedoch zu einer teilweise erheblichen Kontrastverschlechterung bei zweidimensionalen Graustufenbildern.

6 Ergebnisse

Für das WFC zur Vergrößerung der Schärfentiefe wurde eine kubische, refraktiv wirkende Phasenplatte entworfen, welche die Anforderungen an Schärfentiefe und Auflösungsvermögen erfüllt. Die Funktionalität eines Elementes konnte in Experimenten an einem Punktbild demonstriert werden. Die Anwendung des Konzeptes auf die Abbildung zwei- und dreidimensionaler Objekte ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

[1] W. T. Cathey and E. R. Dowski, "New Paradigm for Imaging Systems," *Appl. Opt.* 41, 6080-6092 (2002)

[2] A. Castro and J. Ojeda-Castañeda, "Asymmetric Phase Masks for Extended Depth of Field," *Appl. Opt.* 43, 3474-3479 (2004)

[3] S. S. Sherif and W. T. Cathey, "Reduced Depth of Field in Incoherent Hybrid Imaging Systems," *Appl. Opt.* 41, 6062-6074 (2002)

[4] S. Stoebenau, M. Amberg, and S. Sinzinger, “Ultra-precision micromilling of freeform optical elements for planar microoptical systems integration”, Proc. SPIE, Vol. 6992, 699207 (2008)