

# Bewertung von reinen Phasenfiltern in optischen Abbildungssystemen

Rosemarie Hild<sup>1</sup>, Juan Campos<sup>2</sup>, Maria Yzuel<sup>2</sup>, Claudio Lemmi<sup>3</sup>, Roger Gimeno<sup>2</sup>, Juan Carlos Escalera<sup>2</sup>

1. HTWK-Leipzig, University of Applied Sciences, Fachbereich Informatik, Mathematik u. Naturwissenschaften, 04251 Leipzig, Germany

2. Departamento de Física, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Barcelona, Spain

3. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, (1428) Buenos Aires, Argentina

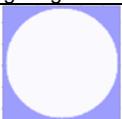
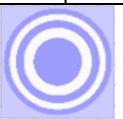
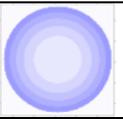
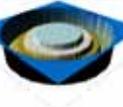
mailto : [hild@imn.htwk-leipzig.de](mailto:hild@imn.htwk-leipzig.de)

Die Abbildungseigenschaften eines optischen Systems können durch reine Phasenfilter in der Pupillenebene grundlegend beeinflusst werden. An hand der Bewertungsfunktionen 3D-PSF und 3D-MTF kann das Abbildungsverhalten vorhergesagt werden.

## 1 Einleitung

Die untersuchten Phasenfilter bestehen aus fünf flächengleichen Ringen. Die Phase in jedem Ring kann konstant variabel modifiziert werden Gl. (1). Zwei Gruppen von Filtern wurden untersucht. Zum einen handelt es sich um Filter in der mehrere Ringe mit einer Phase  $\pi$  belegt sind psm bzw. um Filter deren Phase linear ansteigt f1 oder linear abfällt f2; zum anderen Filter wurden Filter untersucht bei denen nur ein Ring einen Phasensprung von  $\pi$  hervorruft. Dieser Ring wandert von innen nach außen  $\rho_1, \dots, \rho_5$ .

$$P(\rho) = \begin{cases} e^{i\varphi_1} & \text{für } 0 < \rho_1 \\ e^{i\varphi_2} & \text{für } \rho_1 \leq \rho < \rho_2 \\ e^{i\varphi_3} & \text{für } \rho_2 \leq \rho < \rho_3 \\ e^{i\varphi_4} & \text{für } \rho_3 \leq \rho < \rho_4 \\ e^{i\varphi_5} & \text{für } \rho_4 \leq \rho < \rho_5 = 1 \\ 0 & \text{für } \rho \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

Beugungsbegrenzte Pupille	Filter psm
	
Filter f1	Filter f2
	
	

**Tab 1** Phasenfilter mit verschiedenen Phasenbelegungen

## 2 Die Analyse der Bewertungsfunktionen

Die 3D Punktbildfunktion bestimmt die Bildintensität, die durch ein punktförmiges Eingangsobjekt sowohl in radialer als auch in axialer Richtung hervorgerufen wird. Im Sinne der Informationstheorie ist Gl.(2) die Antwort des Abbildungssystems auf einen  $\delta$ -input [1]. Die 3D-PSF für ein optisches System mit kreisförmiger Pupille wird gegeben durch:

$$PSF(r, z) = \left| 2 \int P(\rho) J_0(r\rho) \exp\left\{i \frac{1}{2} z \rho^2\right\} \rho d\rho \right|^2 \quad (2)$$

Die Funktion  $P(\rho)$  schließt die Filtertransmission (1) ein;  $J_0(r\rho)$  ist Bessel-Funktion nullter Ordnung; die Koordinate  $z$  im quadratischen Phasenterm der Exponentialfunktion beinhaltet das Verhalten entlang der optischen Achse.

Eine weitere wichtige Bewertungsfunktion, die zusätzlich notwendig erscheint, um eine vollständige Aussage über die zu erwartenden Abbildungseigenschaften zu erhalten, ist die Modulationsübertragungsfunktion- modulation transfer function MTF. Sie beschreibt den Kontrast für die verschiedenen Ortsfrequenzen  $\nu$

$$MTF(\nu, z) = \frac{\left| \int PSF(r, z) \exp\{ir\nu\} dr \right|}{\left| \int PSF(r, z) dr \right|} \quad (3)$$

Die Ortsfrequenzen variieren zwischen  $\pm 2$ . Sie sind mit der realen Gitterperiode  $p$  durch  $\nu = \frac{\lambda}{pNA}$  verbunden.

Auch hier wird das Abbildungsverhalten entlang der optischen Achse mit einbezogen.

Die 3D-PSF in Abbildung 1 zeigen, dass die Filter f1 und f2 die Fokusebene verschieben, während das Filter psm zwei fokussierte Bilder erzeugen kann. Die Analyse der in Abbildung 2 dargestellten 3D-PSF für die Filter mit nur einem Phasensprung erlaubt die Schlussfolgerung, dass man mit diesen Filtern in Abhängigkeit von der Ringposition eine Erhöhung der Schärfentiefe, oder Multifokuseffekte erzielen kann.

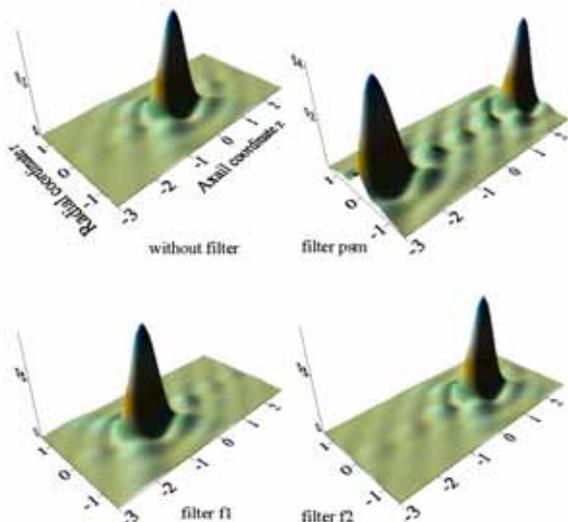


Abb.1 3D-PSF für die Filter aus Tabelle 1

3-dim. Point Spread Function

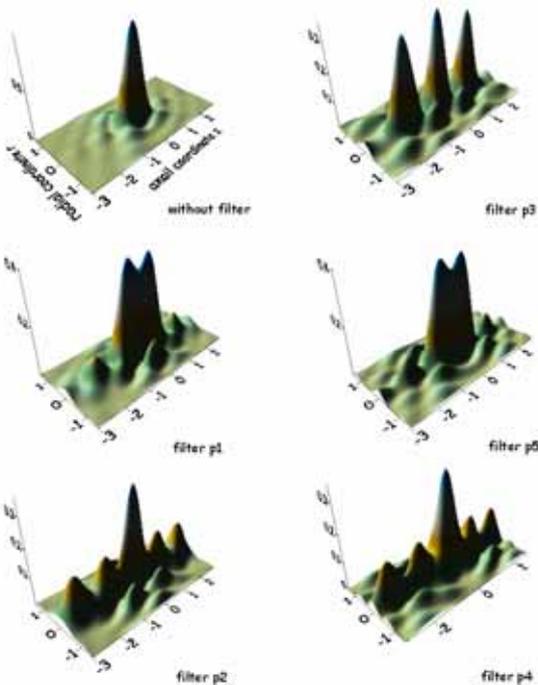


Abb.2 3D-PSF für die Filter mit nur einem Phasenring

Die Interpretation der 3D-PSF allein reicht jedoch nicht aus, um Aussagen über die Veränderung der Abbildungsqualität realer Objekte durch die Filter zu erhalten. Deshalb wurde die Analyse der 3D-MTF erforderlich.

Filter	Lage der Fokusebene
f1	$z = -1; z_{real} = -2 \frac{\lambda}{NA^2}$
f2	$z = 1; z_{real} = 2 \frac{\lambda}{NA^2}$
psm	$z = \pm 2.5 \cdot 2 \frac{\lambda}{NA^2}$

Tab 2 Verschiebung der besten Bildebene

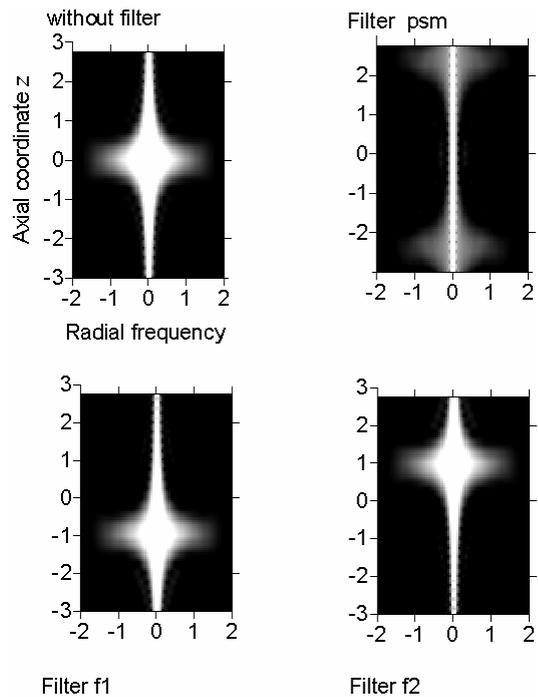


Abb.3 3D-MTF für die Filter aus Tabelle 1

Aus Abbildung 3 erkennt man, dass die Verschiebung der Fokusebene durch die Filter f1 und f2 ohne Kontrastverlust erfolgt. Das Filter psm erzeugt zwar zwei fokussierte Bilder entlang der optischen Achse, jedoch ist der Kontrast für die höheren Ortsfrequenzen geringer als ohne Filter oder für die Filter f1 und f2.

Das Filter p5 erzeugt eine hohe Fokustiefe bei einem hohen Kontrast der kleinen und mittleren Ortsfrequenzen. Es wirkt ähnlich einem Apodisationsfilter. Filter p1 weist ebenfalls eine hohe Fokustiefe auf bietet dabei aber nur eine Kontrastverbesserung für hohe Ortsfrequenzen. Das Filter p3 zeigt einen Multifokuseffekt bei hohem Kontrastverlust.

### 3 Zusammenfassung

Phasenfilter bieten interessante Anwendungsmöglichkeiten in klassischen optischen Abbildungssystemen. Die Veränderung der Abbildungseigenschaften durch reine Phasenfilter, die aus fünf flächengleichen Ringen mit beliebiger konstanter Phasenbelegung in der Pupillenebene bestehen werden anhand der Bewertungsfunktionen untersucht. Mittels spatial light modulators (SLM) wurden die Filter experimentell realisiert. Die mit Hilfe der Analyse der 3D-PSF und der 3D-MTF aufgestellten Prognosen über die Veränderung der Bildintensitäten von Teststrukturen bei der Abbildung durch Systeme mit Filtern wurden in jedem Punkt bestätigt. [2]

[1] J. W. Goodman, Introduction to Fourier-Optics, Mc Graw & Hill, New York, 1968

[2] Proceedings SPIE-Meeting Photonics Europe, Strasbourg 08