

Einfluss der Kamera-Auflösung auf die spatiale Auflösung von Phase Retrieval

Xiyuan Liu, Karl-Heinz Brenner

Lehrstuhl für Optoelektronik, ziti, Universität Heidelberg

<mailto:xiyuan.liu@ziti.uni-heidelberg.de>

Betrachtet man Phase Retrieval als Bildaufnahmeverfahren, so ist festzustellen, dass hier keine Abbildungsoptik zum Einsatz kommt. Daher lässt sich die Auflösungsbegrenzung nicht wie in der Mikroskopie aus der Abbe-Formel berechnen. In dem Beitrag wird der Einfluss der reduzierten Kamera-Auflösung auf die Rekonstruktionsqualität von Phase Retrieval untersucht.

1 Einführung

Lichtmikroskopie ist ein Bildaufnahmeverfahren, um stark vergrößerte Bilder von mikroskopischen Objekten zu erzeugen. Hierbei können nicht beliebig feine Strukturen aufgelöst werden, denn die Auflösung ist durch die Abbe-Formel begrenzt. Entscheidend ist dabei die numerische Apertur, welche durch das Ausbreitungsmedium und die verwendeten optischen Elemente bestimmt wird.

Phase Retrieval (PR) ist ebenfalls ein Bildaufnahmeverfahren zur Bestimmung der komplexen Lichtverteilung, d.h. der Messung von Amplitude und Phase. Das Verfahren basiert auf Intensitätsmessungen der defokussierten Objektwelle in mehreren Ebenen senkrecht zur optischen Achse. Es handelt sich um ein iteratives Verfahren, eine Referenzwelle ist daher nicht notwendig. Der Iterationskern ist die skalare Lichtausbreitung. Im Gegensatz zur Lichtmikroskopie kommt bei PR keine Abbildung zum Einsatz. Die zentrale Fragestellung lautet daher: Wodurch ist bei Phase Retrieval die Auflösung begrenzt?

Die möglichen Faktoren sind zahlreich. Einige wie z.B. Messposition der ersten Ebene, Zahl der Messebenen und Abstand der Messebenen wurden bereits untersucht [1]. In diesem Beitrag wird nur der Einfluss der reduzierten Kameraauflösung auf die Rekonstruktionsqualität in numerischen Simulationen untersucht. Die Methode, mit der die Kameraauflösung in der Simulation reduziert wird, hängt von den verwendeten Propagationsmethoden ab. Hier werden zwei nicht-paraxiale Propagationsmethoden (Nahfeld, Fernfeld) untersucht. Die Unterscheidung zwischen beiden basiert auf dem kritischen Abstand

$$z_k = \frac{N dx^2}{\lambda}. \quad (1)$$

2 Skalare Lichtausbreitungsmethoden

Im Nahfeld $z < z_k$ wird die "Angular Spectrum" Lichtausbreitung (AS) verwendet. Hierbei weisen Eingang und Ausgang das gleiche Sampling auf:

$$u_{AS}(x, y, z) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \tilde{u}_0 \cdot \exp \left(ikz \sqrt{1 - \lambda^2 (\mu^2 + \nu^2)} \right) \right\} \quad (2)$$
$$\tilde{u}_0 = \mathfrak{F} \{ u(x, y, 0) \} \quad dx_{out} = dx_{in}.$$

Somit haben die gerechneten Intensitäten in allen Ebenen das gleiche Sampling. Die Reduzierung der Kameraauflösung wird durch Downsampling mittels Mittelung simuliert. Um zur Rekonstruktionsauflösung zurück zu kommen, wird ein Upsampling mittels „sample and hold“ ausgeführt. Im Fernfeld $z > z_k$ wird die High-NA-Lichtausbreitung (HNFF) gemäß [2] mit integriertem Propagator verwendet. Die Ortskoordinaten am Ausgang weisen ein neues, z-abhängiges Sampling auf.

$$u_{HNFF}(\vec{R}) = \frac{-ik}{2\pi} \frac{z}{R^2} e^{ikR} \iint u(\vec{r}_\perp, 0) e^{\frac{ik}{2z} r_\perp^2} \cdot e^{-ik \frac{R_\perp}{R} \vec{r}_\perp} d^2 r_\perp \quad (3)$$
$$dx_{out} = \frac{z}{z_k} dx_{in}$$

Für $z > z_k$ ist das neue Sampling größer als das ursprüngliche. Jede gerechnete Intensität im Fernfeld hat bereits eine reduzierte Auflösung. Um zur Rekonstruktionsauflösung zurück zu kommen, muss nur noch die inverse Lichtausbreitung ausgeführt werden. Es muss besonders betont werden, dass die High-NA-Lichtausbreitung im Fernfeld keine kaskadierbare Operation d.h.

$$O(z_1 + z_2) \neq O(z_1) \cdot O(z_2) \quad (4)$$

ist. Daher muss die Ausbreitung der Objektwelle von $z_1 > 0$ nach $z_2 > 0$ durch Rückausbreitung über die Ebene $z = 0$ ausgeführt werden.

3 Ergebnisse der Simulationen

Phasen- und Amplitudenobjekt werden getrennt rekonstruiert. Abb. 1 zeigt die Originalamplitude des Amplitudenobjekts (Phase gleich 0) und die Originalphase des Phasenobjekts (Amplitude gleich 1). Weiß entspricht der Amplitude 1 und Schwarz dem Wert 0. Für die Phase wird eine zyklische Farbpalette verwendet, und die Farbskala ist am rechten Rand von Abb. 1 dargestellt. Die

Rekonstruktionen im Nahfeld werden zusammenfassend in Abb. 2 und die im Fernfeld in Abb. 3 präsentiert. Im Nahfeld ist eine Tiefpasscharakteristik für die Rekonstruktion der Amplitudenobjekte und eine Bandpasscharakteristik für die Rekonstruktion der Phasenobjekte deutlich zu sehen.

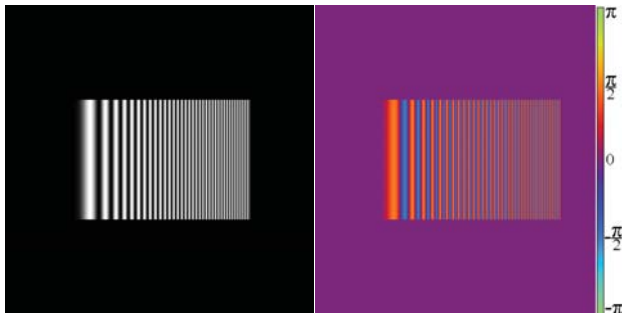


Abb. 1 Links: die Originalamplitude des zu rekonstruierenden Amplitudenobjekts; Rechts: Die Originalphase des zu rekonstruierenden Phasenobjekts (Farbpalette).

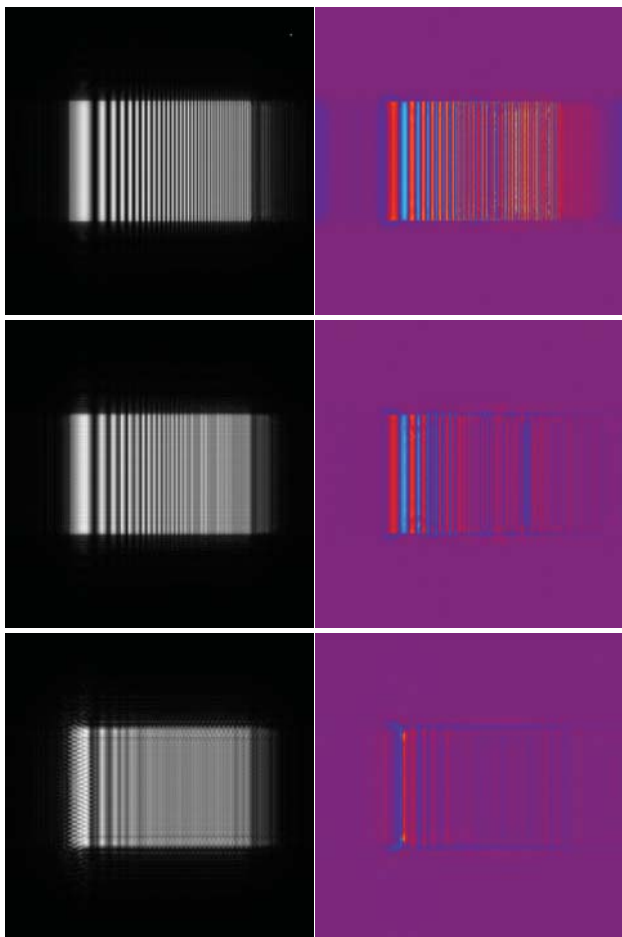


Abb. 2 Rekonstruktionen im Nahfeld: Amplituden des Amplitudenobjekts (links) und Phasen des Phasenobjekts (rechts) mit der Kameraauflösung von $2dx$ (oben), $4dx$ (Mitte) und $8dx$ (unten); dx : Originalauflösung.

Im Fernfeld erhält man eine Bandpasscharakteristik für Amplitudenobjekte und Tiefpasscharakteristik für Phasenobjekte.

Der Vergleich von Nah- und Fernfeld zeigt: Für

Amplitudenobjekte ist die Rekonstruktion im Nahfeld (AS) besser als im Fernfeld (HNFF); umgekehrt, für Phasenobjekte ist die Rekonstruktion im Fernfeld (HNFF) besser als im Nahfeld (AS).

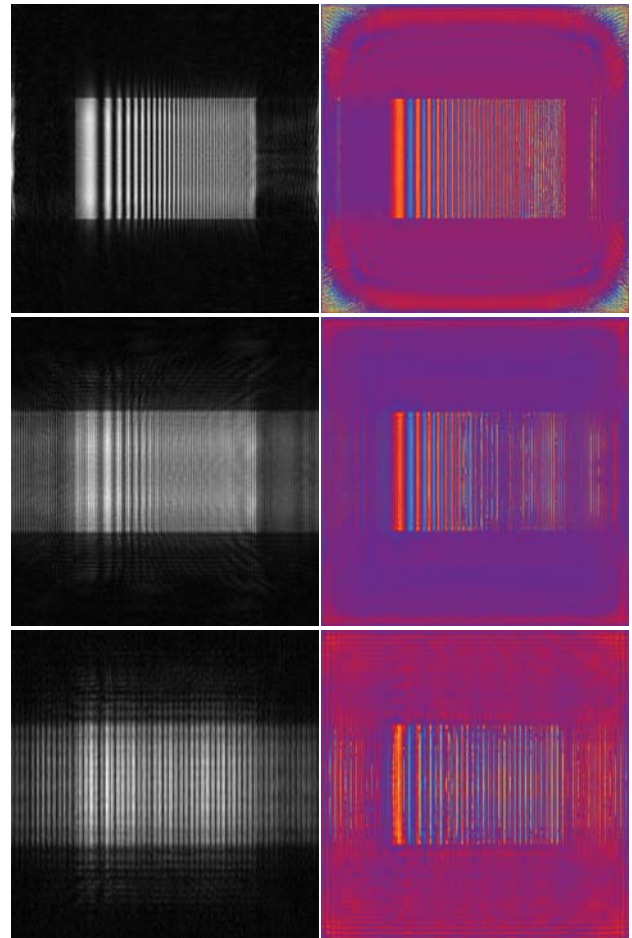


Abb. 3 Rekonstruktionen im Fernfeld: Amplituden des Amplitudenobjekts (links) und Phasen des Phasenobjekts (rechts) mit der Kameraauflösung von $2dx$ (oben), $4dx$ (Mitte) und $8dx$ (unten); dx : Originalauflösung.

4 Zusammenfassung

Die Reduzierung der Kameraauflösung hat einen Einfluss auf die Rekonstruktionsqualität. Weitere Erkenntnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Rekonstruktion in	Amplitudenobjekte	Phasenobjekte
Nahfeld (AS)	TP / +	BP / -
Fernfeld (HNFF)	BP / -	TP / +

Tab. 1 Vergleich der Rekonstruktionen; TP/+: Tiefpasscharakteristik und gute Rekonstruktionen; BP/-: Bandpasscharakteristik und schlechte Rekonstruktionen.

Literatur

- [1] X. Liu, K.-H. Brenner, „Iterative Phasenrekonstruktion mit einem diffraktiven Element“, *DGaO-Proceedings* (2013)
- [2] Y. M. Engelberg, S. Ruschin, „Fast method for physical optics propagation of high-numerical-aperture beams“, *JOSAA* **21**(11), 2135-2145 (2004)