

Phase-Retrieval mit Hilfe verstimmbarer Optiken für die Fourier-Ptychographie

Henri Speck, Xinrui Cao, Thomas Meinecke, Stefan Sinzinger

Fachgebiet Technische Optik, Institut für Mikro- und Nanotechnologien, Technische Universität Ilmenau

<mailto:henri.speck@tu-ilmenau.de>

In diesem Beitrag wird die Anwendung der Fourier-Ptychographie mit anschließendem Phase-Retrieval-Algorithmus an geeigneten Teststrukturen gezeigt.

1 Einführung

Die Auflösung einer optischen Abbildung wird durch die Größe der Öffnung des Abbildungssystems bestimmt. Sie begrenzt in einem 4f-System den spatialen Frequenzbereich, der durch das System übertragen werden kann und somit die räumliche Auflösung der Abbildung. Dieser spatiale Frequenzbereich kann durch eine sukzessive, schräge Beleuchtung und phasenangepasste Kombination der Teilspektren erweitert werden. Diese Methode wird als Fourier-Ptychographie bezeichnet [1]. Auf diese Weise kann die räumliche Auflösung der Abbildung erhöht werden. Durch den Einsatz einer verstimmbaren Membranlinse in das Abbildungssystem ist es möglich, einen defokussierten Bildstapel ohne axiale Verschiebung eines Kamerasensors zu gewinnen, der als Datensatz für einen anschließenden Phase-Retrieval-Algorithmus, zur Rekonstruktion eines Bildes mit komplexen Amplituden in der Fokusebene, verwendet wird [2, 3].

2 Fourier-Ptychographie (FP)

Bei der FP wird aus vielen niedrig aufgelösten Einzelaufnahmen mittels eines iterativen Fouriertransformationsalgorithmus ein hoch aufgelöstes Gesamtbild erstellt. Um einen direkten Zugriff auf die Fourierebene zu erhalten, wird ein 4f-Aufbau verwendet (siehe Abb. 1). Die Größe der Öffnungsblende als spatiales Tiefpassfilter in der Fourierebene begrenzt die Auflösung des optischen Systems und wird an die Erfordernisse des Kamerasensors angepasst. Um nun die geblockten Frequenzanteile zurück zu bekommen, wird der Beleuchtungswinkel sukzessive geändert.

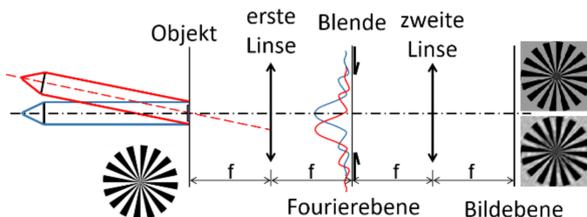


Abb. 1 Prinzipieller Aufbau der Fourier-Ptychographie

Eine schräge Beleuchtung führt zur lateralen Verschiebung der Verteilung in der Fourierebene. Somit ist der Zugriff auf die geblockten Spektralanteile möglich. Die einzelnen Teilspektren können aus den Fouriertransformierten der jeweils aufgenommenen Intensitätsverteilungen der Bildebene iterativ zu einem Gesamtspektrum zusammengesetzt werden. Dadurch ergibt sich eine höhere spatiale Bandbreite und somit eine höhere Auflösung des Gesamtbildes. Dies entspricht der Grundidee des Fourier-Ptychographie-Algorithmus.

3 Fourier-Ptychographie-Algorithmus (FPA)

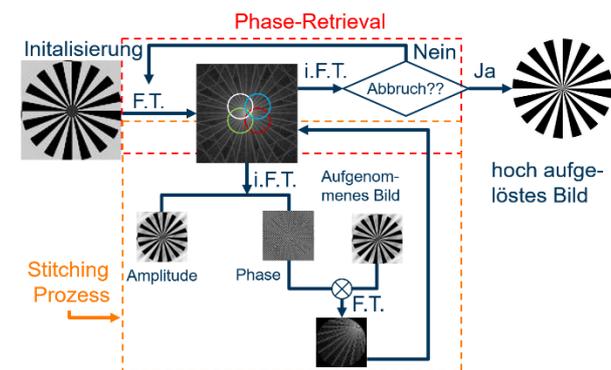


Abb. 2 Fourier-Ptychographie-Algorithmus

Der FPA ist ein iterativer Algorithmus (siehe Abb. 2) und generiert aus einer Anzahl von niedrig aufgelösten Intensitätsbildern ein hoch aufgelöstes Bild, welches sowohl Amplitudenwerte als auch Phaseninformationen besitzt. Für die Zusammensetzung der einzelnen Teilspektren müssen die aufgenommenen Intensitätsbilder phasenangepasst werden. Damit der Algorithmus konvergiert, muss ein Überlappungsbereich der Teilspektren vorhanden sein (Überlappung der farbigen Kreise).

4 Phase-Retrieval mit verstimmbarer Optik

Eine Alternative zur Phasenangepasstung der einzelnen Intensitätsbilder stellt das Phase-Retrieval-Verfahren mit defokussierten Bildern dar. Die Numerik der Darstellung im Rechner bedingt das Einhalten des Abtasttheorems entsprechend Gl. (1), in die die Größen laterale Ausdehnung des Wellenfeldes SE ,

die Wellenlänge λ , die Distanz Δz zwischen den Propagationsebenen, die Abtastrate δX (Pixelgröße des Sensors) und N als Anzahl der Stützstellen eingehen. Um abzuschließen, dass die Kameragröße das Wellenfeld vollständig umfasst, muss die laterale Objektgröße durch eine Blende auf $2W$ begrenzt werden (Abb. 3).

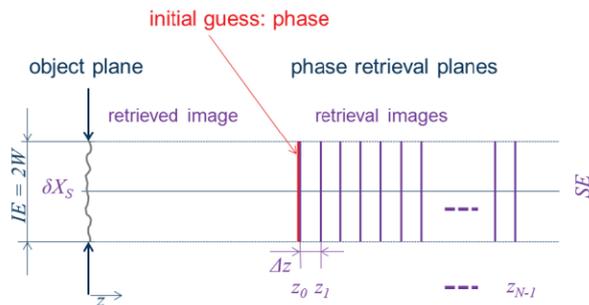


Abb. 3 Phase-Retrieval-Algorithmus

$$SE = \frac{\lambda \Delta z}{\delta X} = N \delta X \quad (1)$$

5 Ergebnisse

Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 4 ersichtlich. Zur Aufnahme der defokussierten Bilder wird eine verstimmbare Optik in den FP-Aufbau integriert. Durch die Verwendung unterschiedlicher Gitterstrukturen konnten störende Reflexe detektiert werden.

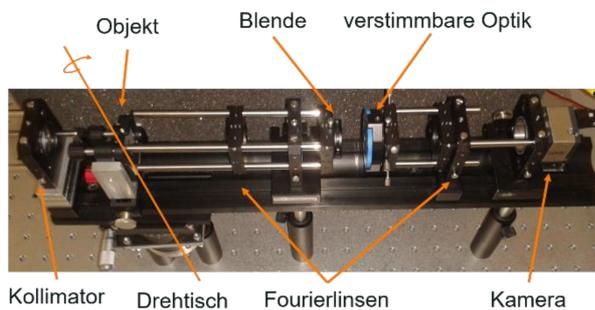


Abb. 4 Aufbau FP mit verstimmbarer Optik

Abhängig von der Schrittweite des Beleuchtungswinkels sind die in Abb. 5 erkennbaren Ergebnisse entstanden.

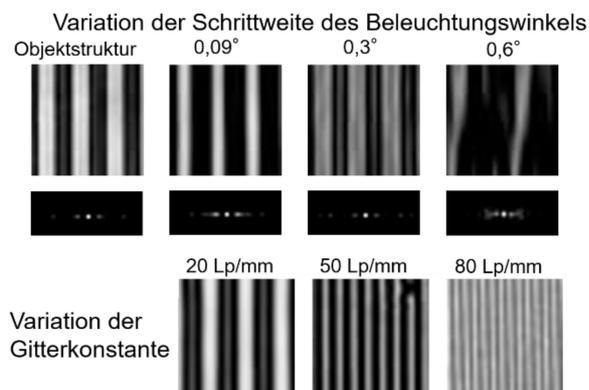


Abb. 5 Ergebnisse der Fourier-Ptychographie

Bei kleinem Winkel ($0,09^\circ$) ist der Informationsgewinn gering, bei großem Winkel ($0,6^\circ$) ist der Überlappungsbereich der einzelnen Teilspektren zu klein. Die Grenzen des Systems sind unter anderem durch die Auflösung der Kamera gegeben. Dadurch konnten Gitterkonstanten mit 80 Lp/mm nicht aufgelöst werden. Es wurden erste Bildrekonstruktionen defokussierter Bildstapel durchgeführt (siehe Abb.6).

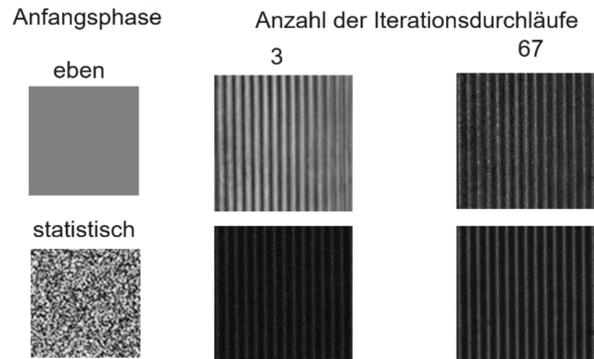


Abb.6 Ergebnisse Phase-Retrieval

Für den vorhandenen Versuchsaufbau ergibt sich ein Propagationsabstand Δz zwischen zwei Ebenen von 8 mm . Da sich für das kritische Sampling Kriterium (nach Gl. (1)) ein Wert von 43 mm für Δz ergab, musste eine numerische Anpassung vorgenommen werden. Zur Erhöhung der Effizienz muss eine Anpassung des optischen Systems an den Propagationsabstand Δz erfolgen. Dafür wird in einer weiterführenden Arbeit die zweite Fourierlinse ersetzt. Bei Verwendung einer Linse mit einer Brennweite von etwa 300 mm ergaben theoretische Betrachtungen die besten Ergebnisse.

6 Zusammenfassung

Für einen erfolgreichen Algorithmus musste der Überlappungsbereich der Teilspektren mindestens 60% betragen. Das System wurde an unterschiedlichen Gitterstrukturen getestet. In dem experimentellen Aufbau konnte die Auflösung des Systems durch Aufnahme von 5 Bildern um einen Faktor von 2 erhöht werden. Es wurden erste Messungen des kombinierten Aufbaus bei senkrechter Beleuchtung durchgeführt. Die Rekonstruktion erfolgte mit dem Phase-Retrieval-Algorithmus für kleine Propagationsabstände zwischen den einzelnen, defokussierten Intensitätsbildern.

Literatur

- [1] G. Zheng, R. Horstmeyer, and C. Yang, "Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy", *Nature photonics*, Jul. 2013
- [2] J.R. Fienup: Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. In: *Optics Letters* (1978), Juli
- [3] T. Meinecke, D. Kelly and S. Sinzinger: Aliasing-free speckle propagation: Critical sampling rules. In: *DGaO Proceedings* (2016), August