

Untersuchung des Schwingungseinflusses auf gemessene Punktspreizfunktionen in der optischen Mikroskopie

Jan Krüger¹, Phillip Manley^{2,3}, Lin Zschiedrich^{2,3}, Martin Hammerschmidt^{2,3}, Philipp-Immanuel Schneider^{2,3}, Rainer Köning¹, Bernd Bodermann¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

² JCMwave GmbH, Bolivarallee 22, 14050 Berlin, Germany

³ Zuse Institute Berlin, Takustraße 7, 14195 Berlin, Germany

<mailto:jan.krueger@ptb.de>

In diesem Beitrag untersuchen wir den Einfluss von homogenen Schwingungen verschiedener Amplituden, Frequenzen und Richtungen auf rigoros simulierte Punktspreizfunktionen (PSF) in der optischen Mikroskopie. Die resultierenden Asymmetrien der PSF und die damit einhergehende mögliche Beeinträchtigung bei der Bestimmung von optischen Aberrationen werden diskutiert.

1 Einführung

Die PSF charakterisiert optische Messsysteme hinsichtlich deren Fähigkeit ein punktförmiges Objekt abzubilden. Einflussfaktoren sind hier unter anderem die optischen Aberrationen des Systems. Diese werden durch Dejustagen und Formfehler der optischen Komponenten (z.B. Linsen, Strahlteiler) hervorgerufen. Bei der Messung einer PSF führen optische Aberrationen wie Koma oder Astigmatismus zu Asymmetrien der PSF im Vergleich zu einer idealen Airy-Scheibe. Ein Beispiel für eine gemessene PSF ist in Abb. 1 gegeben. Dort wurde mit einem UV-Auflichtmikroskop eine Messserie eines quadratischen Chrompunktes auf einem Glassubstrat durchgeführt. Links in Abb. 1 sind bereits Asymmetrien in der Fokusserie, einem Bildstapel entlang der z-Achse, zu erkennen. Rechts wird dann das fokale Bild der Fokusserie durch eine Sinc-Funktion angefitet und anschließend vom Fit abgezogen. Übrig bleiben nur noch die Asymmetrien im fokalen Bild.

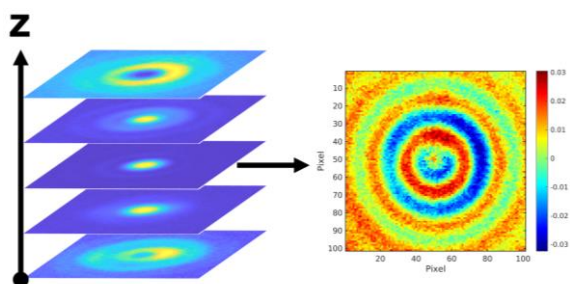


Abb. 1 Asymmetrien des quadratischen Chrompunktes in dessen Fokusserie (links) und in dem fokalen Bild abzüglich des Fits der Sinc-Funktion (rechts)

Eine Charakterisierung der optischen Aberrationen anhand dieser gemessenen Asymmetrien eines Chrompunktes fand bereits in [1] statt. Die dort beschriebene inverse Methode beruht auf rigorosen Simulationen innerhalb eines bayes'schen Optimierungsalgorithmus. Ziel war es hier, einen Ausdruck

für die optischen Aberration eines Mikroskops zu bestimmen. Anschließend sollen diese in allen rigorosen Simulationen als Eingangsparameter verwendet werden. Es ist beabsichtigt, dadurch beispielsweise modellbasierte Auswertungen von bidirektionalen Messungen (z.B. Linienbreiten, Kreisdurchmesser) zu verbessern [2].

In diesem Beitrag wird nun untersucht, ob homogene Schwingungen während der Bildaufnahme ähnliche Asymmetrien bei den simulierten PSF hervorrufen können. Dabei wird zwischen lateralen und vertikalen (z) Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen und Amplituden unterschieden. Abschließend wird noch kurz der Einfluss auf die in [1] beschriebene Methode diskutiert. Es wird in Abschnitt 2 zunächst die Modellierung und Auswertung der Schwingungen und das zugrunde liegende Messsystem vorgestellt. In Abschnitt 3 werden die Ergebnisse dargestellt und in Abschnitt 4 erfolgt eine abschließende Diskussion.

2 Modellierung und Auswertung der Schwingungssimulationen

Ausgangspunkt ist eine ideale aberrationsfreie PSF, die mit Hilfe der Software JCMsuite [3] rigoros simuliert wird. Das Simulationsergebnis entspricht einer Fokusserie. Das hier verwendete Modell beruht auf dem Messsystem und dem Chrompunkt von Abb. 1. Das UV-Mikroskop ($\lambda = 365$ nm) hat eine Beleuchtungs-, und Abbildungs-NA von 0.44 und 0.55. Insgesamt liegt eine Vergrößerung von 200x in der Bildebene vor. Der Durchmesser und die Höhe des quadratischen Chrompunktes betragen ca. 180 nm und 73 nm.

Die Schwingungen werden durch die Mittelung von Repliken der simulierten PSF erzielt, die nur lateral (entlang der x-Achse) oder vertikal (entlang z) zueinander verschoben sind. Weiterhin wird ein leichtes Amplitudenrauschen (± 1 %) auf jede Replik gelegt.

Dies ist am Beispiel der fokalen Bilder einer lateralen Verschiebung in Abb. 2 dargestellt.

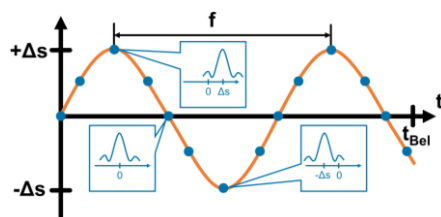


Abb. 2 Schema der Schwingungssimulation für eine laterale Schwingung mit 14 Abtastpunkte

Über eine Belichtungszeit der Kamera von t_{Bel} hat die dort skizzierte Schwingung der Frequenz f ca. 1,5 Perioden. Für die homogene Schwingung werden gleichmäßig verteilte Abtastpunkte definiert. Diese Punkte entsprechen jeweils einer verschobenen PSF. Die maximale absolute Verschiebung entspricht $\pm\Delta s$. Die Belichtungszeit entspricht der experimentellen Belichtungszeit von 45 ms. Die Schwingungsfrequenzen wurden auf Basis der Eigenfrequenzen des Aufbaues (100 Hz & 130 Hz) ausgewählt. Die Amplitude beträgt 100 nm oder 150 nm. An die gemittelte PSF wird dann wie in Abb. 1 eine Sinc-Funktion angefügt (Bayes'sche Optimierung) und abgezogen, um einen visuellen Eindruck der simulierten Schwingung zu ermöglichen. Da die Sinc-Funktion einer Näherungslösung entspricht, wurde sie hier für die Auswertung des quadratischen Chrompunktes ausgewählt.

3 Ergebnisse

In Abb. 3 werden die Ergebnisse der Untersuchungen für sechs verschiedene PSFs dargestellt. Die Fit-Residuen der axialen Schwingung in b) und c) unterscheiden sich im Vergleich zu dem Residuum von a) nur leicht. Die Größenordnung der Fit-Residuen ist nahezu identisch. Während der Fit in a) am Mittelpunkt des Bildes angesetzt hat, liegen in b) und c) leichte Abweichungen von dieser Position vor. Weiterhin ist der Abschnitt des Residuums des ersten Beugungsringes in b) und c), der näher am nicht zentralen Mittelpunkt des Fits liegt, ausgeprägter als der Rest des Beugungsringes im Residuum. Diese Asymmetrie tritt auch in der ausgewerteten Messung in Abb. 1 auf. In d), e) und f) sind mit steigender Amplitude und Frequenz der Schwingung immer deutlichere Asymmetrien mit größer werdenden Fit-Residuen entlang der x- und y-Achse zu erkennen. Der erste Beugungsring ist den Residuen in d) und e) noch zu erkennen. In f) ist der Beugungsring nicht mehr zu bestimmen.

4 Diskussion

Für die simulierten axialen und lateralen Schwingungen in dieser Arbeit konnte ein Verschmieren der PSF festgestellt werden. Dieses konnte durch den Sinc-Fit nicht vollständig entfernt werden, wo-

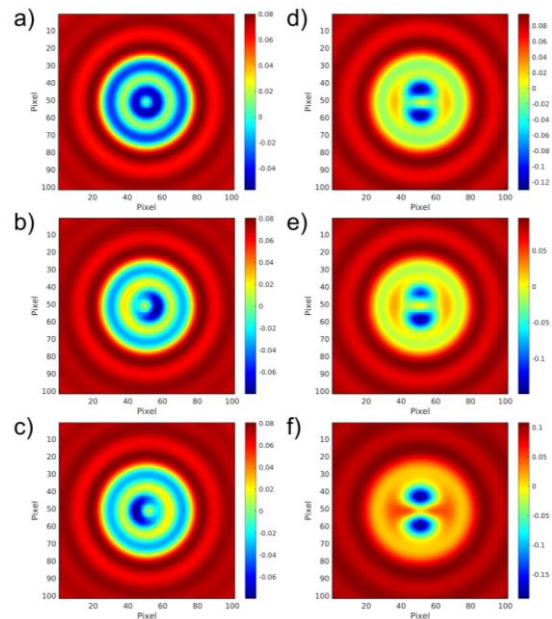


Abb. 3 Ergebnisse der Schwingungsuntersuchungen für eine PSF mit einer homogenen Schwingung von a) ohne Schwingung, b) $f = 100$ Hz und $\Delta s = 100$ nm (axial), c) $f = 130$ Hz und $\Delta s = 150$ nm (axial), d) $f = 100$ Hz und $\Delta s = 100$ nm (lateral), e) $f = 130$ Hz und $\Delta s = 100$ nm (lateral) und f) $f = 130$ Hz und $\Delta s = 150$ nm (lateral)

gehoben wurden. Es konnte festgestellt werden, dass die simulierten axialen Schwingungen zu ähnlichen Fit-Residuen führen, wie es in der Messung in Abb. 1 der Fall ist, sodass diese durch auf axiale Positionsabweichungen während der Bildaufnahme sein könnten ist. Auch für das in [1] beschriebene Verfahren wurde die verschmierte PSF als Ausgangspunkt für eine Aberrationsbestimmung verwendet. Der Algorithmus hat hier die Verschmierung der PSF durch optische Aberrationen ausgeglichen. Aufgrund der resultierenden Asymmetrien und der möglichen Fehlinterpretation sollten auch quantitative, optische Mikroskope bestmöglich gegen mechanische und akustische Schwingungsanregungen isoliert sein.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Projektes „SiM4diM“ (Projekt-ID: 01 IS 20 080).

Literatur

- [1] P. Schneider, P. Manley, J. Krüger et al., „Reconstructing phase aberrations for high-precision dimensional microscopy,” Proc. SPIE 12137, 121370I (2022)
- [2] J. Krüger, R. Köning, B. Bodermann, „Systematic approach on illustrating the challenges represented by optical bidirectional measurements using rigorous simulations,” Proc. SPIE 11057, 110570D (2019)
- [3] JCMwave GmbH, „JCMsuite - Simulation Suite for Nano-Optics,” <https://jcmwave.com/jcmsuite> (abgerufen am 25.07.2022)