

Phasenkontrast durch Datenlast

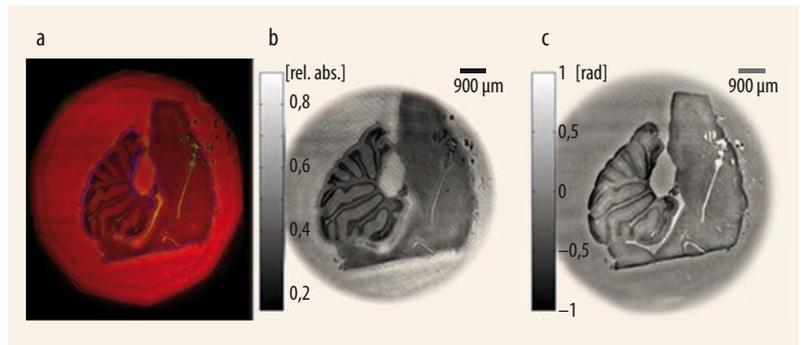
Datenredundanz ermöglicht linsenfreie Mikroskopie.

Lars Lötgering

Bei der linsenfreien Mikroskopie amplituden- und phasenmodulierender Objekte kommen kohärente Phasenrekonstruktionsmethoden zum Einsatz. Mit Hilfe von iterativen Algorithmen lassen sich dabei aus einem redundanten Datensatz von Beugungsbildern hochauflösende Rekonstruktionen bestimmen.

Die reichhaltige Geschichte der optischen Bildgebung ist untrennbar mit der Nutzung von Linsen verbunden. Während Teleskope ferne Galaxien darstellen, machen Mikroskope Strukturen in der Nanowelt sichtbar. Die Verwendung von Linsen scheint naheliegend, nutzt doch das menschliche Auge ebendiese, um Informationen zu sammeln. Dennoch wächst derzeit das Interesse an Abbildungsverfahren, die ohne Linsen auskommen. Seit den Arbeiten von Ernst Abbe Ende des 19. Jahrhunderts ist bekannt, dass das Auflösungsvermögen von Mikroskopen an die Wellenlänge des Lichts gekoppelt ist: Bildgebung mit kurzwelliger Strahlung erlaubt demnach eine hohe Auflösung. Die Herstellung von Linsen für EUV- und Röntgenstrahlung ist aber mit hohem technischen Aufwand verbunden, sodass linsenfreie Abbildungsverfahren eine sinnvolle Alternative bieten. Die Renaissance linsenfreier Verfahren in der Röntgenmikroskopie beruht auf der zunehmenden Leistungsfähigkeit moderner Computer und auf der Entwicklung neuartiger kohärenter Röntgenstrahlungsquellen [1].

Der Begriff Coherent Diffraction Imaging (CDI) fasst einige linsenfreie Abbildungstechniken zusammen. Hierbei wird ein Objekt mit einer kohärenten Lichtwelle bestrahlt. Die Störung der Welle durch das Objekt hat charakteristische Beugungs- und Interferenzeffekte zur Folge. Diese lassen sich ohne Linse auf einem Detektor aufzeichnen und enthalten Informationen über das Objekt. Elektronische Detektoren messen allerdings nicht die zeitabhängigen Oszillationen oder Phasenlagen elektromagnetischer Strahlung, die nötig sind, um die Daten zu interpretieren und das Objekt zu rekonstruieren. Verschiedene Techniken lösen dieses Problem: In der Phasenkontrastmikroskopie wird das von einem Objekt ungestreute Licht mit dem gestreuten Licht in Phase gebracht, sodass transparente Objekte durch Interferenzkontrast sichtbar werden [2]. Die Holographie basiert auf dem Vergleich einer gebeugten Welle mit einer Referenzwelle, sodass die unbekannte Phasenlage indirekt in den gemessenen Daten kodiert



In der Rekonstruktion eines histologischen Schnitts aus einem Mausgehirn kodieren Helligkeit die Absorption und

Farbe die Phasenverschiebung (a). Absorption (b) und Phasenverschiebung (c) sind mit 14 μm Auflösung rekonstruiert.

ist [3]. Beim CDI hingegen geht es darum, ein inverses Problem zu lösen: Lässt sich aus dem Beugungsbild eines Objekts ohne Kenntnis der Phasenlage des Wellenfeldes das zugehörige Objekt selbst rekonstruieren? Diese Frage ist im allgemeinen Fall eines stark streuenden und absorbierenden Objekts mathematisch nicht beantwortet [4]. Empirische Ergebnisse legen aber den Schluss nahe, dass dies möglich ist, falls die gemessenen Daten einen gewissen Grad an Redundanz aufweisen, es also zusätzliche Information im Sinne einer mathematischen Überbestimmtheit gibt [5]. Die Idee besteht darin, verlorene Phaseninformation aus der vorliegenden Datenredundanz wiederzugewinnen.

Datenredundanz kann je nach Experiment auf unterschiedliche Weise vorliegen. Beim Single-Shot-CDI gibt es in vielen Fällen *a priori* Informationen zum Objekt [6]. Diese kann dazu dienen, die im Beugungsbild verschlüsselte Information mit Hilfe von iterativen Algorithmen zu entschlüsseln. Liegt vorab keine Information über das Objekt vor, können spezielle Mess-

KOMPAKT

- Liegt in verschiedenen Beugungsbildern eines Objekts redundante Information vor, lässt sich die Phaseninformation daraus rekonstruieren.
- Bei der Ptychographie entsteht die Redundanz, weil die Beugungsbilder eines endlich großen Lichtstrahls überlappen.
- Eine neue Variante des so genannten Coherent Diffraction Imaging greift auf Beugungsbilder zurück, die ein Detektor aufnimmt, während er entlang einer Schraubenlinie zum Objekt positioniert wird.

Lars Lötgering, M. Sc., Hochschule Koblenz, RheinAhr-Campus, Joseph-Rovan-Allee 2, 53424 Remagen – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2016 auf der Jahrestagung der DPG in Regensburg

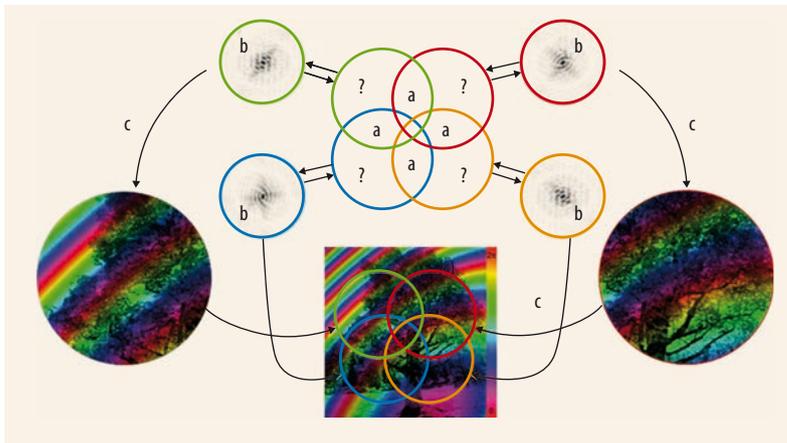


Abb. 1 Bei der Ptychographie gibt es mehrfach beleuchtete Regionen (a), so dass die zugehörigen Beugungsbilder (b) die Objektinformation redundant enthalten. Ein iterativer Algorithmus

nutzt diese Beugungsbilder, um ein unbekanntes Objekt zu rekonstruieren (c). In dieser Rekonstruktion simulierter Daten kodieren Helligkeit die Absorption und Farbe die Phasenmodulation.

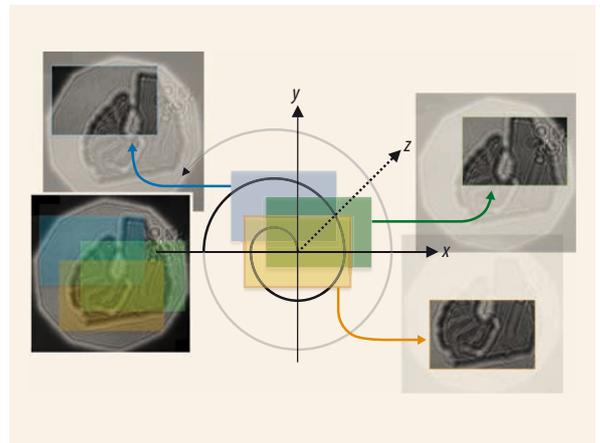


Abb. 2 Beugungsbilder entstehen entlang einer Schraubenbahn hinter dem Objekt, wenn der Detektor in xy -Ebene und in z -Richtung geschickt verschoben wird. Ein Kollimator richtet die Daten zueinander aus, um das Objekt aus den Bildern zu rekonstruieren.

techniken Redundanz bewirken. Ein Beispiel hierfür ist die Ptychographie [7], bei der ein Lichtstrahl das Objekt abscannt. Falls die beleuchteten Objektflächen überlappen, wird die dort vorliegende Information mehr als einmal, also redundant, gemessen (Abb. 1).

Am Institut für Röntgenoptik der Hochschule Koblenz wird CDI basierend auf einer Messgeometrie realisiert, die ähnlich der Ptychographie Datenredundanz ausnutzt, um unbekannte Proben zu mikroskopieren (Abb. 2) [8]. Anstatt das Objekt wie in der Ptychographie zu scannen, wird der Detektor in Richtung der sich ausbreitenden, gebeugten Welle verschoben. Dadurch entsteht ein Satz von Beugungsbildern in unterschiedlichen Abständen zum Objekt, der die zur Objektrekonstruktion notwendige Datenredundanz enthält. Zusätzlich bewegt sich der Detektor entlang einer Spirale, um auch stark gestreute Signale zu detektieren und ein großes Bildfeld sowie eine hohe Auflösung zu liefern.

Ein $10\ \mu\text{m}$ dicker histologischer Schnitt eines Mausgehirns ließ sich aus 105 Beugungsbildern mit einer Auflösung von $14\ \mu\text{m}$ rekonstruieren (Abb. auf S. 73). Die Beugungsbilder entstanden bei einer Wellenlänge von $488\ \text{nm}$ (Argon-Ionen-Laser) im Abstand von 200 bis $450\ \text{mm}$ hinter der Probe auf einer CMOS USB-Kamera (UI-1226LE-M, 8 Bit). Die Größe des Detektors betrug 480×720 Pixel à $6\ \mu\text{m}$. Koregistrierung erlaubte es, das Bildfeld auf 2048×2048 Pixel zu erweitern, obwohl pro Beugungsbild nur ein kleiner Teil des Wellenfeldes aufgenommen wurde [8]. Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Beugungsbilder darf dabei eine charakteristische Länge nicht überschreiten, damit die notwendigen Korrelationen des Wellenfeldes zur Koregistrierung der Beugungsbilder vorliegen [9]. Mit einem iterativen Algorithmus lassen sich die durch die Beugungsbilder gegebenen Randbedingungen an das Objekt sequenziell implementieren.

Bei diesem Messverfahren ist es für die Rekonstruktion nicht notwendig, Vorwissen über das Objekt zu haben oder Information über die Scan-Geometrie. Mögliche Anwendungen liegen z. B. in der Computer-

tomographie, bei der die Rekonstruktion des vom Objekt ausgehenden Wellenfeldes erforderlich ist, um die Gewebeverteilung eines dreidimensionalen Objekts zu bestimmen. Im sichtbaren Spektralbereich sind linsenfreie Messtechniken in Mobiltelefonen denkbar, weil für hochauflösende Linsen der Platz fehlt. Allerdings muss stets der notwendige Grad an Datenredundanz vorliegen. Verglichen mit linsenbasierten Abbildungsverfahren stellt der erhöhte Aufwand in der Datenakquisition und -auswertung eine Herausforderung dar, die noch zu lösen ist, bevor Methoden des Coherent Diffraction Imaging eine breite Anwendung in Industrie und Forschung finden werden.

Literatur

- [1] H. N. Chapman und K. A. Nugent, *Nature Photon.* **4**, 833 (2010)
- [2] F. Zernike, *Z. tech. Phys.* **16**, 454 (1935)
- [3] D. Gabor, *Nature* **161**, 777 (1948)
- [4] Y. Shechtman et al., *IEEE Signal Process. Mag.* **32**, 87 (2015)
- [5] J. Miao et al., *JOSA A* **15**, 1662 (1998) und P. Thibault et al., *Science* **321**, 379 (2008)
- [6] J. Miao et al., *Nature* **400**, 342 (1999)
- [7] H. M. L. Faulkner und J. M. Rodenburg, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 023903 (2004)
- [8] M. Guizar-Sicairos et al., *Opt. Lett.* **33**, 156 (2008)
- [9] L. Loetgering, R. Hammoud, L. Juschkina und T. Wilhein, *Europhys. Lett.* **111**, 64002 (2015)

DER AUTOR

Lars Lötgering schloss 2013 an der Technischen Hochschule Köln sein Bachelorstudium und 2015 an der Hochschule Koblenz sein Masterstudium in Applied Physics ab. Dabei studierte er mit einem Fulbright Stipendium an der University of North Florida in Jacksonville in den USA. Seit November 2015 arbeitet er im Rahmen einer Promotion an der Lösung von inversen Problemen in der Optik am Institut für Röntgenoptik an der Hochschule Koblenz. Daneben beschäftigt er sich unter anderem mit Musik, Instrumentenbau und Schach.



Rohrer / DPG