

Mehr-Ordnungen-Mikroskopie mittels Multilagen-Zonenplatte in harten Röntgenstrahlen

M. Osterhoff¹, R.N. Wilke¹, J. Wallentin¹, C. Eberl², F. Döring², H.U. Krebs², M. Sprung³, T. Salditt¹

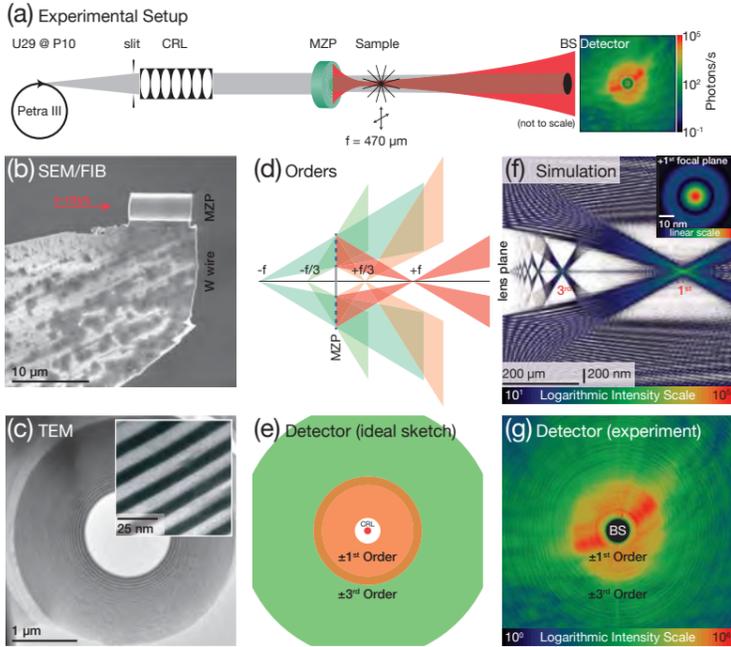
¹ Institut für Röntgenphysik, Georg-August-Universität Göttingen

² Institut für Materialphysik, Georg-August-Universität Göttingen

³ DESY Photon Science, Hamburg

Multi-Ordnungen

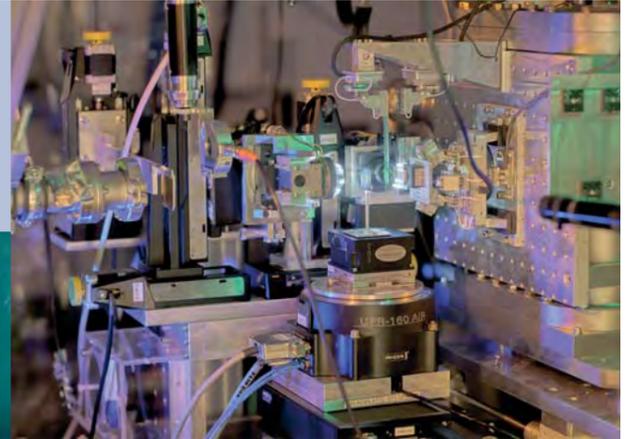
- Wir beschreiben Bildgebungsexperimente mittels Multilagen-Zonenplatten (MZP), die einen vorfokussierten Synchrotronstrahl auf die zu untersuchende Probe fokussieren; im Fernfeld befindet sich ein Pixeldetektor.
- Linse wird mittels FIB auf einen Halter montiert
- Überblicks- und Detailaufnahme der Zonen im TEM
- Als diffraktive Optik erzeugen binäre Zonenplatten eine Vielzahl konvergierender und divergierender Ordnungen. Hier fragen wir: **Kann man auch ohne Order Sorting Apertur arbeiten?**
- Im idealen Detektorbild können die Kegel der 1. und 3. Ordnungen fast getrennt werden
- Simulation der Fokussierung entlang der optischen Achse; kleiner Einsatz zeigt +1. Fokusordnung; vergleiche mit d
- Typisches experimentelles Detektorbild; vergleiche mit e



Die Experimente

Rechts: Der GINIX-Aufbau am Kohärenz-Strahlrohr P10, PETRA III
Unten: Während der Justage können Zonenplatte und Probe mittels optischer Mikroskope betrachtet werden

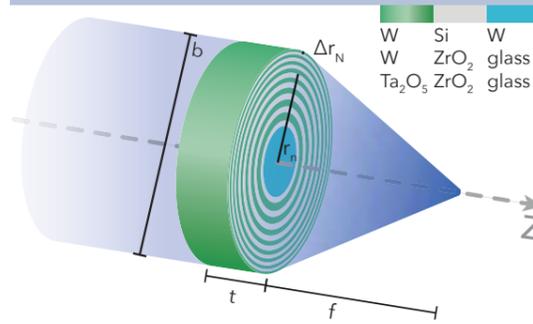
Energie: 7,9 keV, 13,8 keV, 18,0 keV
Fokuslängen: 50 μ m, 250 μ m, 470 μ m
Materialien: W / Si, W / ZrO₂, Ta₂O₅ / ZrO₂
Vorfokussierung: KB-Spiegel, CRL
Detektoren: Pilatus 300k, sCMOS
asd: asd
asd: asd



Die Linsen

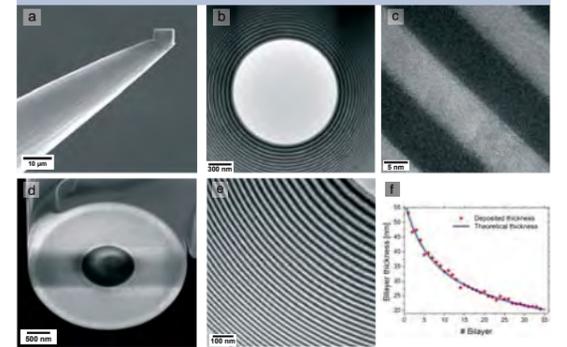
In der Mitte der Linsen ist ein dünner Glasdraht, 800 nm $\leq \phi \leq 2 \mu$ m; bislang konnten Linsen mit $r_N \leq 7 \mu$ m hergestellt werden.

Darauf sind abwechselnde Schichten eines optisch dünnen und dicken Materials, z.B. W und Si. Besonders gute Eigenschaften konnten für Ta₂O₅ und ZrO₂ gefunden werden:
- sehr konstante PLD-Raten während der Deposition,
- keine Tröpfchenbildung (im Gegensatz zu Si),
- sehr saubere und dünne Schichten,
- Restrauhigkeiten des Drahtes werden ausgeschmiert,
- Effizienz in +1. Ordnung: 6,9 % bei 18 keV



Linsenherstellung

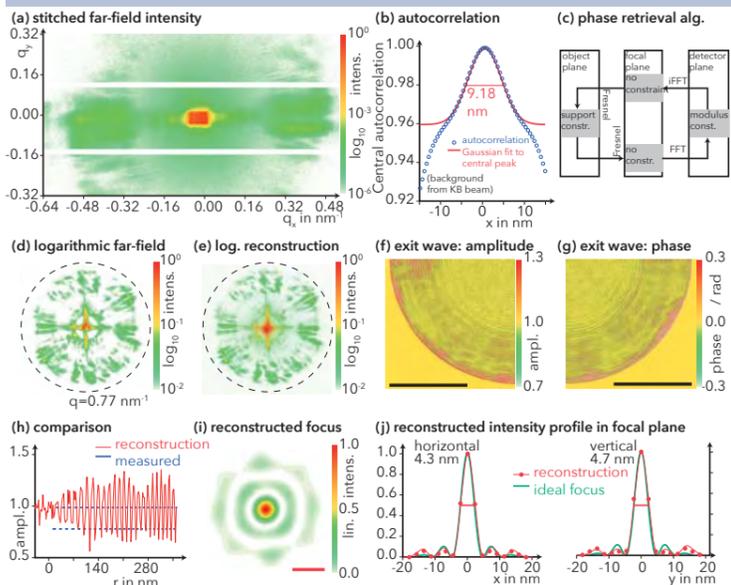
- Mittels gepulster Laserdeposition (PLD) werden die Schichten auf einen sich drehenden Draht aufgebracht.
- Im FIB werden Linsen gewünschter Länge auf einen Halter montiert
- Übersichts-TEM-Aufnahme einer Linienstruktur
- Detailaufnahme: Schichten können mit nur 5 nm Dicke erzeugt werden
- Im FIB wird die Oberfläche der Linse poliert
- Rest-Rauhigkeiten des Glasdrahtes werden im PLD-Prozess nach außen hin abgebaut, im Gegensatz zur kumulierten Rauigkeit anderer Sputterverfahren
- Die Schichtdicken werden vermessen und entsprechen dem Zonenplattenbildungsprozess



Fokusgröße

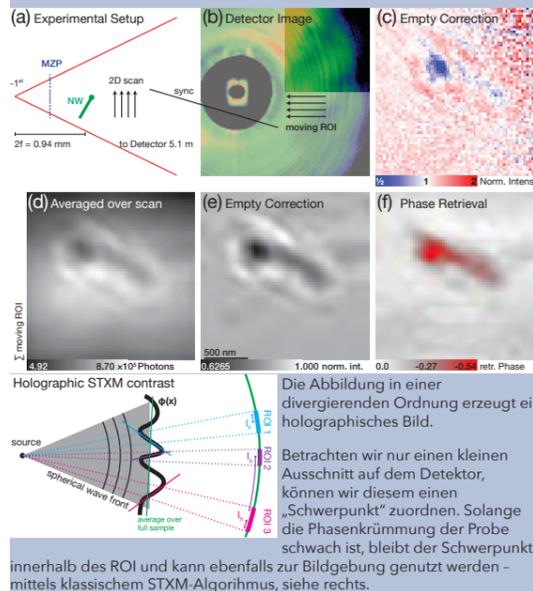
- Fernfeld (Pilatus-Detektor, horizontal zusammengesetzt) der ersten Linse, daraus kann mittels Autokorrelation ...
- eine typische Längenskala der Diffraktionskraft bestimmt werden. Eine Halbwertsbreite von 9,18 nm entspricht dabei einer Streustruktur von 4,6 nm
- Drei-Ebenen-Algorithmus zur Phasenrekonstruktion, nach [Quiney 2006]
- Logarithmisch aufgetragene gemessene Intensität auf dem Detektor (sCMOS)
- Logarithmisch aufgetragene rekonstruierte Intensität auf dem Detektor
- Rekonstruierte Amplitude in der Linsenebene,
- Rekonstruierte Phase in der Linsenebene; auch innerhalb des Drahtes werden Zonen schwachen Kontrasts rekonstruiert, da dieser Bereich durch einen Mittenschritt verschattet ist
- Die rekonstruierten Zonen stimmen gut mit den gemessenen Zonen überein
- Rekonstruierte Intensität in der Fokalebene
- Horizontaler und Vertikaler Schnitt durch die Fokalebene; Gauß-Anpassungen ergeben eine Halbwertsbreite von 4,3 nm x 4,7 nm, der bislang kleinste zweidimensionale Röntgenfokus

Experiment bei 7,9 keV und einer Brennweite von 50 μ m; W/Si-System



Holographisches Abbilden

- Ein Halbleiter-Nanodraht wurde abgerastert, ...
- das Diffraktionssignal der divergierenden -1. Ordnung ...
- über 1647 positionskorrigierte Detektorbilder gemittelt; die Ringe im Fernfeld werden dadurch ausgemittelt.
- Durch Mittenschritt und geometrische Abschwächung ergibt sich ein Helligkeitsgradient, der durch Leerbilder korrigiert werden kann.
- zeigt das Ergebnis eines Phasenrekonstruktionsalgorithmus.



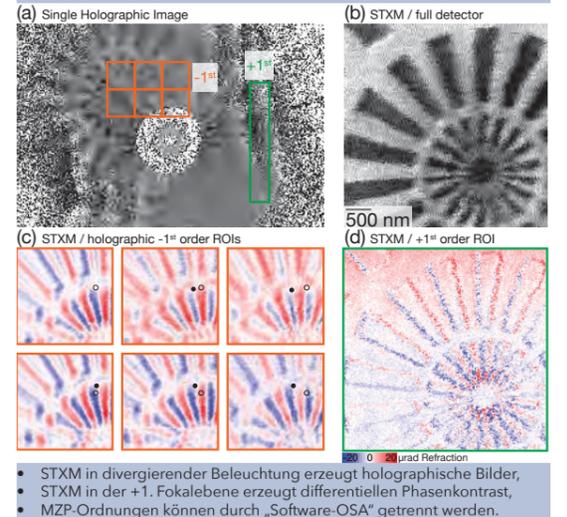
Abbilden durch Rastern

- In diesem Experiment wurde eine Siemenstern-Teststruktur abgerastert.
- Im Fernfeld ist ein holographisches Bild des Sterns zu sehen; dieses stammt aus der divergenten Beleuchtung mit der -1. Ordnung.

Diese Intensitäten $I(x,y)$ sind für jede Raster-Position (x,y) aufgenommen. Der differentielle Phasenkontrast (horizontal) $I_h(x,y)$ ist definiert als

$$I_h(x,y) = \frac{\sum_{x',y' \in ROI} X - I(x',y',X,Y)}{\sum_{x',y' \in ROI} I(x',y',X,Y)}$$

- zeigt dieses Signal, summiert über den ganzen Detektor,
- zeigt I_h nur für die orangenen Detektorausschnitte,
- zeigt das Signal für den grünen Ausschnitt.



- STXM in divergierender Beleuchtung erzeugt holographische Bilder,
- STXM in der +1. Fokalebene erzeugt differentiellen Phasenkontrast,
- MZP-Ordnungen können durch „Software-OSA“ getrennt werden.

Referenzen

[Quiney 2006] H.M. Quiney, A.G. Peele, Z. Cai, D. Paterson, K.A. Nugent
Diffractive imaging of highly focused X-ray fields
Nature Physics 2, 101-104 (2006)

[Ruhlandt 2012] A. Ruhlandt, T. Liese, V. Radisch, S.P. Krüger, M. Osterhoff, K. Giewekemeyer, H.U. Krebs, T. Salditt
A combined Kirkpatrick-Baez mirror and multilayer lens for sub-10 nm x-ray focusing
AIP Advances 2, 012175 (2012)

[Döring 2013] F. Döring, A.L. Robisch, C. Eberl, M. Osterhoff, A. Ruhlandt, T. Liese, F. Schlenkrich, S. Hoffmann, M. Bartels, T. Salditt, H.U. Krebs
Sub-5 nm hard x-ray point focusing by a combined Kirkpatrick-Baez mirror and multilayer zone plate
Optics Express 21, 19311-19323 (2013)

[Osterhoff 2013] M. Osterhoff, M. Bartels, F. Döring, C. Eberl, T. Hoinkes, S. Hoffmann, T. Liese, V. Radisch, A. Rauschenbeutel, A.L. Robisch, A. Ruhlandt, F. Schlenkrich, T. Salditt, H.U. Krebs
Two-dimensional sub-5 nm hard x-ray focusing with MZP
Proc. of SPIE Vol. 8848 (2013)

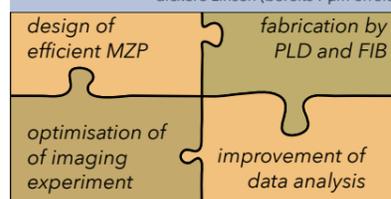
[Eberl 2014] C. Eberl, F. Döring, T. Liese, F. Schlenkrich, B. Roos, M. Hahn, T. Hoinkes, A. Rauschenbeutel, M. Osterhoff, T. Salditt, H.U. Krebs
Fabrication of laser deposited high-quality multilayer zone plates for hard x-ray nanofocusing
Applied Surface Science 307, 638-644 (2014)

Die Arbeiten wurden finanziert durch die DFG im Sonderforschungsbereich 755 „Nanoscale Photonic Imaging“ und durch die BMBF-Verbundforschung unter den Fördernummern 05KS7MGA und 05K10MGA.

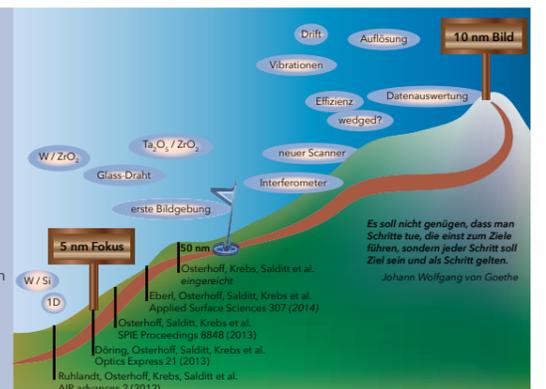
Ausblick

Auf dem Weg zu 10 nm Auflösung:

- Drift: interferometrisch messen und korrigieren
- Vibrationen: ebenfalls messen, entscheiden: Bild verwerfen? Entfallen? neuer Probenraum
- langsame Scans: neuen schnellen Scanner in Betrieb nehmen
- Effizienz 6,9%: Zonenklingen entlang Draht anpassen, z.B. wedged-Struktur dickere Linsen (bereits 7 μ m erreicht)



- verwende Positionsdaten in Algorithmen
- Volumen- bzw. Wellenleitereffekte verstehen
- Verträglichkeit mit hohen Intensitäten testen -> FEL
- Nano-Diffraktion, Nano-Fluoreszenzarten, Nano-Stimulation (z.B. XBIC)



Es soll nicht genügen, dass man Schritte tut, die ein Ziel führen, sondern jeder Schritt soll Ziel sein und als Schritt gelten.
Johann Wolfgang von Goethe