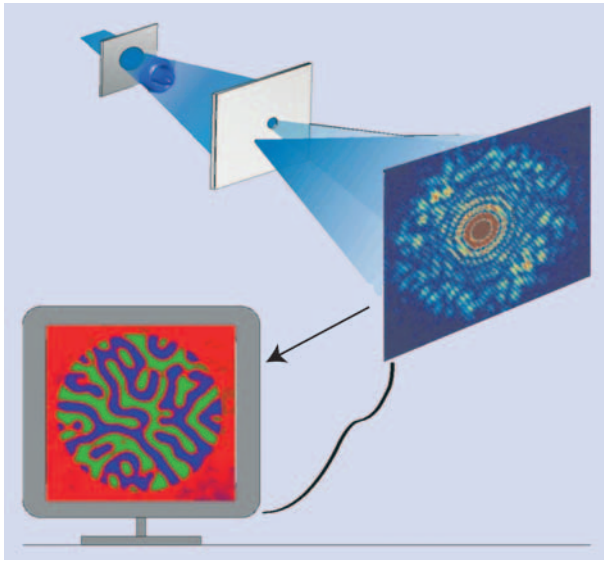


Röntgenmikroskopie ohne Linsen

Am Berliner Speicherring BESSY-II ist es gelungen, die Domänenstruktur einer Co/Pt-Multischicht durch Holographie linsenlos und direkt sichtbar zu machen.

Die Röntgenstrukturanalyse liefert täglich den Löwenanteil der molekularen Strukturinformation für fast alle Disziplinen, von den Werkstoffwissenschaften bis zur Strukturbiologie. Eine klassische Einschränkung dieser Methode besteht jedoch



Bei der Röntgenholographie wird der Undulatorstrahl durch ein erstes Loch auf die laterale Kohärenzlänge eingeschränkt, sodass er quasi-kohärent die Objektebene mit der Probenöffnung und dem Loch des Referenzstrahl beleuchtet. Im Fernfeld wird das durch die Überlagerung entstandene Hologramm aufgezeichnet, aus dem sich die magnetische Domänenstruktur durch numerische Rücktransformation ergibt. (Quelle: BESSY)

darin, dass die Phase des gestreuten Lichtes nicht gemessen werden kann. Dieses so genannte Phasenproblem verhindert eine eindeutige Objektrekonstruktion aus den Beugungsdaten. Außerdem liegen bei klassischen Röntgenexperimenten wie bei kaum einer anderen Untersuchungsmethode viele (typisch fünf bis sieben) Größenordnungen zwischen der Wellenlänge und dem Strahldurchmesser. Das Verhältnis zwischen dem durch die Wellenlänge bestimmten Auflösungsvolumen zum Probenvolumen ist entsprechend noch mal um einen Faktor zwei bis drei höher. Aus diesem Grund liefert die Röntgenstrukturanalyse Strukturinformationen nur im Ensemble-Mittel. Sie liegt in ihrer klassischen Form damit genau am entgegen gesetzten Ende moderner Einzelmolekültechniken.

Mithilfe der Röntgenmikroskopie lassen sich beide Einschränkungen überwinden, jedoch bisher noch um den Preis einer erheblich reduzierten Auflösung und häufig auch nur bei ungenügend hohem Kontrast. Als Röntgenlinsen für die Mikroskopie werden so genannte Fresnelsche Zonenplatten verwendet, deren lithographische Herstellung ihre Auflösung jedoch auf zurzeit etwa 20 nm begrenzt [1]. Werte in diesem Bereich sind zudem nur für weiche Röntgenstrahlung, nicht aber für höhere (multi-keV) Photonen-Energien erreicht worden. Während an diesen Grenzen mit einigem Aufwand geforscht und entwickelt wird, tun sich gleichzeitig in jüngster Zeit eine Reihe von alternativen Ansätzen und neue Röntgenoptiken auf.

Frei nach dem Motto „die beste Optik ist keine Optik“ kann das Phasenproblem im Fall von nicht-periodischen Strukturen aber bei kohärenter Beleuchtung auch durch das „Überabtasten“ (*Oversampling*) im Impulsraum unter Randbedingungen iterativ gelöst und damit das Bild auf dem Computer „errechnet“ werden [2]. Bei diesem Verfahren ist das Auflösungsvermögen letztlich durch den verfügbaren kohärenten Photonenfluss limitiert, den hochbrillanten Röntgenquellen wie etwa der X-FEL zukünftig um mehrere Größenordnungen steigern werden.

Stefan Eisebitt und Kollegen aus Berlin und Stanford haben das Spektrum der Möglichkeiten nun mit einem einfachen Aufbau signifikant erweitert, der die Objektrekonstruktion ohne Einschränkung erlaubt [3]. Sie verwenden ebenfalls räumlich (partiell) kohärente Undulator-Strahlung bei einer Photonenenergie von 778 eV (resonant abgestimmt auf die L₃-Kante von Co) und blenden die Strahlung in der Objektebene durch eine

absorbierende Folie bis auf zwei versetzte kreisförmige Öffnungen aus. Eine Kreisscheibe von 1,5 μm Durchmesser trägt dabei das Probenmaterial, in diesem Fall ein magnetisches Schichtsystem mit der zu bestimmenden magnetischen Domänenstruktur, und ein zweites, etwas versetztes Loch mit einem Durchmesser von 100 nm definiert den Referenzstrahl. Beim Durchtritt durch die Probe wird die Phasenfront der Röntgenwelle in charakteristischer Weise in Amplitude und Phase verändert. Die gestreute Welle überlagert sich im Fernfeld mit der Referenzwelle, sodass ein Hologramm entsteht. Durch einfache Fourier-Rücktransformation des Streubildes erhält man die räumliche Autokorrelationsfunktion des Objektes (Patterson-Funktion). Da das Objekt nun aus einem Probenbereich und der fast „ δ -förmigen“ Referenzöffnung besteht, erhält man in der Patterson-Funktion räumlich getrennt ebenfalls zwei Anteile: neben der Autokorrelation des Objektes die Faltung der Probenstruktur mit der Referenzstruktur, im Grenzfall einer δ -Funktion also genau wieder die Probenstruktur. Das heißt, für diese geschickte Anordnung entspricht ein räumlicher Bereich der Patterson-Funktion schon der Probenstruktur selbst.

Die Auflösung der Abbildung ergibt sich dabei durch die Größe des Referenzstrahls. Für das mittels Ionenstrahl hergestellte Loch würde man also 100 nm Auflösung erwarten. Überraschenderweise zeigte das Bild von Eisebitt et al. eine noch höhere Auflösung von etwa 50 nm. Ob dies mit Wellenleitereffekten in der Referenzöffnung erklärt werden kann, also unter Berücksichtigung der konischen Form und des Aspektverhältnisses von etwa 1:6, ist noch unklar. Fest steht, dass bei ei-

KURZGEFASST...

■ Anti-Wasserstoff dank Laser-Kontrolle

Die grundlegende Frage, ob Anti-Wasserstoff ($\bar{\text{H}}$) die gleichen Eigenschaften hat wie Wasserstoff, versuchen zwei Experimente am CERN zu beantworten. Der ATRAP-Kollaboration ist es nun gelungen, H-Atome in definierten angeregten Zuständen zu erzeugen. Dazu regten sie zunächst Cs-Atome per Laser in Rydberg-Zustände an. Durch Kollisionen mit Positronen entstand angeregtes Positronium (ein gebundenes Positron-Elektron-Paar) und durch einen weiteren Stoß mit kalten Antiprotonen angeregter Anti-Wasserstoff. Diese Methode hat das Potenzial, auch ausreichend

kaltes $\bar{\text{H}}$ zu erzeugen, das sich in einer Falle einfangen und spektroskopieren lässt. C. H. Story et al., Phys. Rev. Lett. 93, 263401 (2004)

■ Erzeugung von Kohlenstoff

In Sternen entsteht Kohlenstoff-12 in einem komplizierten Prozess aus drei α -Teilchen. Eine europäische Kollaboration hat durch die Analyse des inversen Zerfallsprozesses nun gezeigt, dass die bisherigen temperaturabhängigen Entstehungsraten teilweise revidiert werden müssen, mit Konsequenzen für Fusionsprozesse in Sternen und die Nukleosynthese in Supernovae. H. O. U. Fynbo et al., Nature 433, 136 (2005)

ner weiteren Reduzierung der Strukturgröße die Beschreibung des Objektes durch eine rein zwei-dimensionale Struktur nicht mehr möglich ist. Die Verteilung des elektrischen Feldes im Referenzstrahl muss dann in drei Dimensionen explizit berechnet werden. Der Übergang zu immer kleineren Referenzstrahlen und damit immer größerer Auflösung führt damit notwendigerweise auf Röntgenwellenleitereffekte [4] bis hinunter zur theoretischen Grenze minimaler Strahldurchmesser. Nach einer theoretischen Arbeit von Bergeman et al. zeigt sich nämlich, dass die Grenze der Fokussierung höchstwahrscheinlich nicht durch die Wellenlänge selbst, sondern zuvor schon auf fundamentale Weise durch den Brechungsindex des verwendeten Materials bestimmt wird [5]. Dies führt auf eine untere Grenze erreichbarer Strahldurchmesser von 8 nm bis 20 nm, je nachdem, welches Material man verwendet.

Neben der Auflösung ist der Kontrast die zweite wichtige Größe. Im Experiment von Eisebitt und Kollegen wird der magnetische Kontrast durch die Verwendung zirkular polarisierter Strahlung erreicht und durch Subtraktion zweier Hologramme entgegen gesetzter Helizität verstärkt. Der magnetische Streuquerschnitt wurde durch resonante Effekte an der Co-L₃-Kante überhöht. Auf Anhieb wurde eine mit dem Rasterröntgenmikroskop vergleichbare Auflösung und vergleichbaren Kontrast erzielt, mit einer linsenlosen und vergleichsweise einfachen experimentellen Anord-

nung. Die Erweiterung auf den harten Röntgenbereich und die Steigerung der Auflösung liefert sicherlich noch einige Herausforderungen für die Zukunft.

Bei welcher Auflösung und welchem Kontrast nanoskopische Proben mit nanoskopischen Röntgenstrahlen in Zukunft schließlich abgebildet werden können, bleibt offen. Die Vision, Materie mit ultrakurzen X-FEL-Röntgenpulsen bei hoher Orts- und Zeitauflösung „zu filmen“, ist sicherlich ein großer Ansporn. Ob und wie genau das Ziel erreicht wird, wissen wir nicht. Statt genau einer „Röntgenmikroskopie“ werden wir es in Zukunft wahrscheinlich mit einer Vielzahl von „Mikroskopie-en“ im Röntgenbereich zu tun haben. Welche Spielart sich bei welcher Photonenenergie und bei welcher Fragestellung durchsetzt, wird schließlich die Anwendung entscheiden. Die nun vorgestellte Fourier-Transformation-Holographie mit kohärenter Röntgenstrahlung ist ein wichtiger Meilenstein auf diesem Weg!

TIM SALDITT

- [1] M. Peuker, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2209 (2001)
- [2] J. W. Miao, P. Charalambous, J. Kirz und D. Sayre, *Nature* **400**, 342 (1999)
- [3] S. Eisebitt, J. Lüning, W.F. Schlotter, M. Lörgen, O. Hellwig, W. Eberhardt und J. Stöhr, *Nature* **432**, 885 (2004)
- [4] F. Pfeiffer, C. David, M. Burghammer, C. Riekkel und T. Salditt, *Science* **297**, 230 (2002)
- [5] C. Bergemann, H. Keymeulen und J. F. van der Veen, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 204801 (2003)

■ Drei Ionen für ein Quantenbit

Quantencomputer sind auf Algorithmen zur Fehlerkorrektur angewiesen.

Redundanz in gespeicherten Daten kann man benutzen, um trotz Fehlern Informationen sicher und genau zu rekonstruieren. Dxaher ksoetet es ums lkaum Muhe, disen vollig fulsch geschriebenen Satz zu lesen, obwohl hier in fast jedem Wort ein Fehler steckt. In unserem Gehirn läuft eine Fehlerkorrektur ab. In jedem Computer, beim Hören einer CD und beim Empfang von Daten ist solch eine Fehlerkorrektur nötig, die im Hintergrund arbeitet. Für einen zukünftigen Quantencomputer sind derartige Algorithmen ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Der Gruppe um D. Wineland am NIST in Boulder, USA, ist es kürzlich gelungen, auf einem elementaren Quantenprozessor einen Fehlerkorrektur-Algorithmus experimentell zu demonstrieren [1].

Das Interesse an Quantencomputern liegt in neuartigen Rechenprogrammen für spezielle Probleme, wobei die Gesetze der Quantenlogik geschickt benutzt werden und jeder herkömmliche Computer in den Schatten gestellt wird. Daher bemühen sich Forscher über diverse experimentelle Ansätze um dieses Ziel. Anders als ein klassisches Bit, das nur die binäre Information der logischen Werte 0 oder 1 speichert, tragen nun elementare Einheiten der Information (Quantenbits) eine Superpositionsinformation $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ mit komplexen Amplitu-

Prof. Dr. Tim Salditt,
Institut für Röntgen-
physik, Universität
Göttingen, Geiststr.
11, 37073 Göttingen