

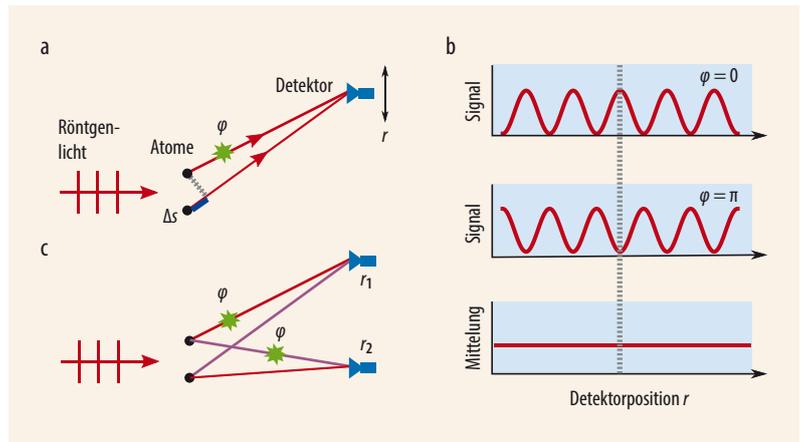
## Korreliert abgebildet

Eine neue Methode erlaubt es, mit inkohärent gestreutem Licht Strukturen auf atomarer Skala räumlich abzubilden.

**S**ehen heißt verstehen – daher haben bildgebende Verfahren in Forschung und Technik eine herausragende Bedeutung. Um kleinste Strukturen abzubilden, ist seit vielen Jahrzehnten die Röntgenkristallographie etabliert. Damit ist es möglich, die Struktur kristallisierter Moleküle abzubilden, was etwa für die Entschlüsselung des menschlichen Erbguts entscheidend war. Viele biologisch relevante Moleküle kristallisieren aber nicht. Mithilfe des „Coherent Diffractive Imaging“ lassen sich dennoch einzelne nanoskopische Objekte durch Röntgenbeugung analysieren [1]. Kürzeste Röntgenpulse erlauben es nicht nur, einzelne Moleküle und Nanokristalle abzubilden, sondern auch chemische Prozesse zeitlich aufgelöst darzustellen.

Um in Streubildern stabile Interferenzmuster zu erhalten, muss der gesamte Prozess kohärent ablaufen. Die hohe Intensität der Röntgenstrahlung, die für ein hinreichendes Signal nötig ist, führt aber zu inkohärenter Streuung, z. B. durch Fluoreszenzstrahlung oder zunehmende Compton-Streuung. Kürzlich haben Physiker aus Erlangen und Hamburg ein komplementäres Abbildungsverfahren gefunden, das genau dieses inkohärente Streulicht ausnutzt („Incoherent Diffractive Imaging“) [2, 3].

Das Prinzip lässt sich mit einer Variante des Doppelspalt-Experiments illustrieren, bei der Licht an zwei Atomen streut (Abb. 1). In einem Detektor wird durch den Unterschied  $\Delta s$  der Streupfade ein Interferenzmuster nachgewiesen. Die charakteristische räumliche Frequenz, mit der sich das Muster in festen Abständen wiederholt, hängt von der Anordnung der Atome ab. Im Allgemeinen folgt das gebeugte Licht der räumlichen Fourier-Transformation der zu untersuchenden Struktur. Inkohärente Streuung lässt sich durch eine Phasenverschiebung  $\varphi$  in einem der Streupfade modellieren, die das In-



**Abb. 1** Streut Licht kohärent an zwei Atomen, ergibt sich ein Interferenzmuster in der Intensität (a). Eine Phasenänderung  $\varphi$  verschiebt das Interferenzmuster (b). Für inkohärent gestreutes Licht verschwindet beim Mitteln über  $\varphi$  die

Struktur aus dem Detektorsignal. Beim „Incoherent Diffractive Imaging“ nutzt man das Korrelationsignal der Intensitäten aus verschiedenen Detektoren (c). So bleibt auch nach dem Mitteln die Strukturinformation erhalten.

terferenzmuster räumlich versetzt. Bei längeren Messungen variiert  $\varphi$  zufällig, und das Interferenzmuster geht verloren: Kohärente Methoden sind nicht mehr anwendbar.

Daher ist beim „Incoherent Diffractive Imaging“ die Belichtungszeit so kurz, dass  $\varphi$  währenddessen konstant bleibt. Dann zeigt jeder Schnappschuss ein Interferenzmuster, das jedoch abhängig von  $\varphi$  zufällig verschoben ist. Ein Mitteln aller Einzelaufnahmen löscht daher weiterhin die Interferenz aus. Multipliziert man aber die Intensitäten an zwei Detektorpositionen  $r_1$  und  $r_2$ , bleibt nach dem Mitteln als Funktion des Abstands  $(r_2 - r_1)$  ein Interferenzmuster bestehen. Bis auf eine Konstante entspricht es dem Muster, das sich aus kohärenter Streuung ergibt, weil in der relativen Koordinate  $(r_2 - r_1)$  die absolute Verschiebung durch  $\varphi$  nicht beiträgt. Im Bild des Doppelspaltexperiments lässt sich das Muster durch die Interferenz von zwei möglichen Pfaden erklären, welche die von beiden Atomen emittierten Photonen zurücklegen können.

Die Idee, aus Intensitätskorrelationen Strukturinformationen zu gewinnen, ist nicht neu. Vor über 50 Jahren verwendeten Ro-

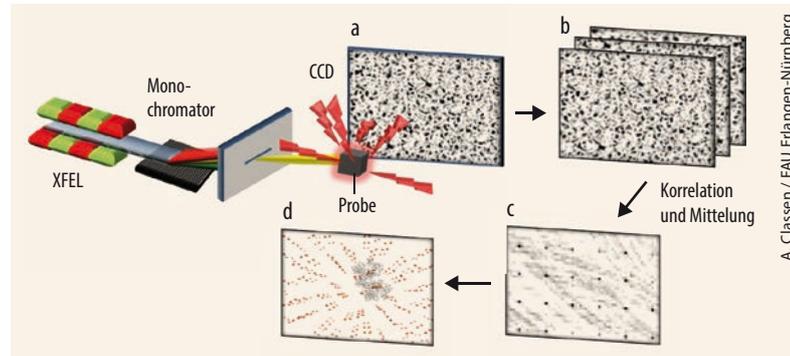
bert Hanbury Brown und Richard Q. Twiss analoge Ansätze, um den Durchmesser von Sternen zu messen [4]. Diese Arbeiten waren ein Auslöser für die folgende systematische quantenmechanische Beschreibung von Lichtfeldern mithilfe von Korrelationsfunktionen durch Roy Glauber, ein Grundbestandteil der modernen Quantenoptik [5]. Diese Konzepte auf eine mehrdimensionale Abbildung komplexer atomarer Anordnungen zu erweitern, war jedoch herausfordernd, weil dann viele räumliche Frequenzen zu schwer analysierbaren Intensitätskorrelationen führen und die Messdaten von den Koordinaten aller Detektoren abhängen.

Um das neue Verfahren zu demonstrieren, erzeugten die Forscher die Phasenänderungen zwischen den „Schnappschüssen“ unter kontrollierten Bedingungen [2]. Dazu verwendeten sie die Strahlung des Freie-Elektronen-Lasers FLASH bei DESY in Hamburg mit 13,2 nm Wellenlänge und bildeten eine Maske ab, deren Löcher je 4  $\mu\text{m}$  groß sind und eine zweidimensionale hexagonale Struktur darstellen. An der Maske findet keine inkohärente Streuung statt,

sodass die Strahlung keine Phasenänderung erfährt. Stattdessen wurde die räumliche Phasenstruktur des einfallenden Lichts durch einen Diffusor von Puls zu Puls zufällig variiert. Eine CCD-Kamera zeichnete für jeden Puls einen „Schnappschuss“ auf, wobei die  $300 \times 300$  verwendeten Pixel der Kamera als Matrix unabhängiger Detektoren dienten und somit die gleichzeitige Messung von Intensitätskorrelationen bei verschiedenen relativen Abständen erlaubten. Ausgewertet wurden aber nur die Intensitäten an den so genannten magischen Positionen, an denen nur wenige bekannte räumliche Frequenzen zur Intensitätskorrelation beitragen können. Damit war es möglich, alle Frequenzen der gesamten Struktur in mehreren einfacheren Teilschritten zu bestimmen und die Struktur der Maske exakt zu rekonstruieren.

In einer zeitgleich erschienenen theoretischen Arbeit wird die Methode auf verblüffend einfache Art für dreidimensionale Strukturen verallgemeinert [3]. Die Autoren nutzen aus, dass Kreuzkorrelationen der Amplituden des gebeugten Lichts an verschiedenen Detektorpositionen auch im inkohärenten Fall die gewünschten Strukturinformationen enthalten (Abb. 2). Zwar ergeben sich im Experiment nur Intensitäten – für das an den Atomen gestreute Licht entspricht das Betragquadrat dieser Kreuzkorrelation bis auf eine Konstante aber gerade der Intensitätskorrelation zweiter Ordnung. Diese Beziehung gilt nicht für beliebige Lichtquellen, ist aber als Siegert-Relation bereits für thermisches Licht wie das einer Glühbirne bekannt. Weil aus dem „Incoherent Diffractive Imaging“ die Intensitätskorrelation zweiter Ordnung folgt, erhält man damit die gleichen Strukturinformationen wie mit kohärenten Methoden.

Auf atomarer Größenskala steht die experimentelle Demonstration zwar noch aus. Die Methode nutzt aber ideal die Eigenschaften von Freie-Elektronen-Lasern, deren Pulse sehr intensiv und kurz sind. Weil das „Incoherent Diffractive Imaging“ nur inkohärent streuende



**Abb. 2** Monochromatisierte FEL-Strahlung streut inkohärent an der Probe. Eine CCD-Kamera detektiert das Interferenzmuster, das von den zufälligen Phasen der inkohärenten Streuung abhängt

(a). Beim Mitteln der Intensitätskorrelationen vieler Aufnahmen (b) ergibt sich ein Bild der Fourier-Transformation des Objekts (c). Aus diesem lässt sich die Struktur des Objekts rekonstruieren (d).

Atome abbildet, könnte es beispielsweise ermöglichen, die Funktion von Metallatomen in Biomolekülen zu untersuchen. So spielen etwa Eisen-Schwefel-Cluster bei der Umwandlung inerer Stickstoffmoleküle in eine biologisch verwertbare Form eine wichtige Rolle [6], und Mangan-Calcium-Cluster sind für die Photosynthese relevant [7]. Bei diesen Reaktionen treten subtile Strukturänderungen der Cluster auf, die das neue Verfahren möglicherweise auflösen könnte, weil der große Wirkungsquerschnitt für inkohärente Streuung hohe Signalaraten verspricht. Schon die einzelnen Bilder dieses Verfahrens enthalten mehr Strukturinformationen als bei kohärenter Streuung,

weil sich die Detektoren unabhängig positionieren lassen und die Intensität des gestreuten Lichts räumlich gleichmäßiger verteilt ist – ein wesentlicher Fortschritt bei der Röntgenstrukturanalyse.

Jörg Evers

- [1] A. Barty, J. Küpper und H. N. Chapman, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **64**, 415 (2013)
- [2] R. Schneider et al., *Nat. Phys.* (2017), DOI: 10.1038/nphys.4301
- [3] A. Classen et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 053401 (2017)
- [4] R. Hanbury Brown und R. Q. Twiss, *Nature* **178**, 1046 (1956)
- [5] R. J. Glauber, *Phys. Rev.* **130**, 2529 (1963)
- [6] T. Spatzel et al., *Science* **345**, 1620 (2014)
- [7] J. Yano und V. Yachandra, *Chem. Rev.* **114**, 4175 (2014)

Priv.-Doz. Dr. Jörg Evers, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg

## MYONEN ENTHÜLLEN WEITERE KAMMER

Das Innenleben der Cheops-Pyramide ist komplexer als gedacht: Ägyptische, japanische und französische Physiker entdeckten einen Hohlraum oberhalb der Großen Galerie, der etwa zwei Meter breit, acht Meter hoch und 47 Meter lang ist. Dazu wiesen sie Myonen aus

der Höhenstrahlung mit Plastiksintillatoren nach. Die Methode ist nicht neu: In den 1960er-Jahren ließ sich damit zeigen, dass es in der Chephren-Pyramide nur eine Kammer gibt. K. Morishima et al., *Nature* (2017), DOI: 10.1038/nature24647



Dudarev Mik hail / Shutterstock