

# Simuliert, ausgehöhlt, superaufgelöst

Highlights aus dem Programm der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP)

Rainer Scharf

In diesem Jahr hat die Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP) gemeinsam mit der Sektion Kondensierte Materie in Dresden getagt. Hier folgt eine Auswahl von Themen der SAMOP.

## Quantenmikromechanik

Mikro- oder nanometergroße mechanische Oszillatoren eignen sich hervorragend dazu, das Grenzgebiet zwischen klassischer Mechanik und Quantenmechanik zu erkunden. Sie bestehen aus einer großen Zahl von Atomen, zudem ist es möglich, ihre Bewegungen auf Quantenniveau zu kontrollieren und zu detektieren.

Für eine volle quantenmechanische Kontrolle koppelt man einen mechanischen Oszillator mit einem Quantenobjekt, das bereits unter Kontrolle ist. Das kann z. B. ein Ensemble ultrakalter Atome sein, wie Philipp Treutlein von der Universität Basel erklärte. Ultrakalte Atome lassen sich in optischen Gittern oder auf Atomchips festhalten (Abb. 1), in gewünschte interne Quantenzustände oder in kollektive Schwingungszustände bringen oder mit Lasern kühlen. Zudem erlauben sie es, durch Fluoreszenz oder mit Methoden der Cavity-QED einzelne Quanten zu detektieren.

Treutlein stellte verschiedene erfolgversprechende Wege vor, ultrakalte Atome mit mechanischen Oszillatoren zu koppeln. So kann ein Mikrobalken mit seinem frei beweglichen Ende durch Oberflächenkräfte mit einem Bose-Einstein-Kondensat in einer magnetischen Falle wechselwirken. Die Schwingungen des Balkens sind dann mit den Bewegungen der Atome in der Falle gekoppelt. Bei einem anderen Verfahren,

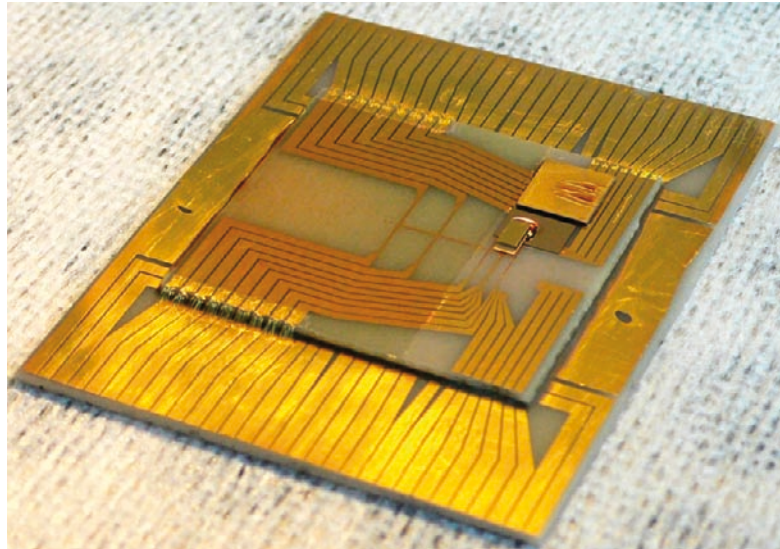


Abb. 1 Auf einem solchen Atomchip lassen sich ultrakalte Atome festhalten.

das Treutlein und seine Kollegen entwickelt haben, gelang es ihnen, eine schwingende Membran aus Siliziumnitrid durch eine Lichtwelle mit den ultrakalten Atomen zu koppeln. Die nur 50 nm dicke Membran hatte eine Masse von  $10^{-8}$  g, eine Eigenfrequenz von 250 kHz und eine mechanische Güte von  $1,5 \cdot 10^6$ . Ein von der Membran reflektierter Laserstrahl erzeugte eine stehende Lichtwelle, deren periodisches optisches Muldenpotential die lasergekühlten Atome etwa einen Meter von der Membran entfernt festhielt. Oszillierte die Membran, bewegte sich die stehende Lichtwelle und mit ihr das Potential, sodass auf die Atome eine Kraft wirkte, die sie in Bewegung setzte.

Die Bewegung der Atome wiederum führte dazu, dass sich die Photonen in den Laserlichtmoden, die die stehende Welle bildeten, umverteilten. Dadurch änderte sich der Strahlungsdruck auf die Membran. Diese Rückwirkung der Atome auf die schwingende Membran hing – anders als die Wirkung

der Membran auf die Atome – von der Reflektivität der Membran ab. Die Kopplung zwischen dem mechanischen Oszillator und den Atomen ist also asymmetrisch. Bei starker Laserkühlung haben die Atome die Membranschwingungen durch die Kopplung zusätzlich gedämpft. Die Forscher konnten erstmals beobachten, wie die Atome auf die schwingende Membran rückwirken. Die gemessene Zunahme der Dämpfungskonstante war proportional zur Zahl der Atome im optischen Potential und stimmte gut mit der theoretischen Vorhersage überein. Damit hatten die Atome eine merkliche Wirkung auf die Membran, obwohl ihre Gesamtmasse zehnmillionenmal kleiner war als die Masse der Membran. Mithilfe einer großen Zahl lasergekühlter Atome ließ sich die Membran in ihren Schwingungsgrundzustand bringen, erklärte Klemens Hammerer von der Universität Hannover, der über die Quantentheorie des Systems berichtete. Vielleicht gelingt es auch, quantenmechanische Überlagerungszustän-

SLAC

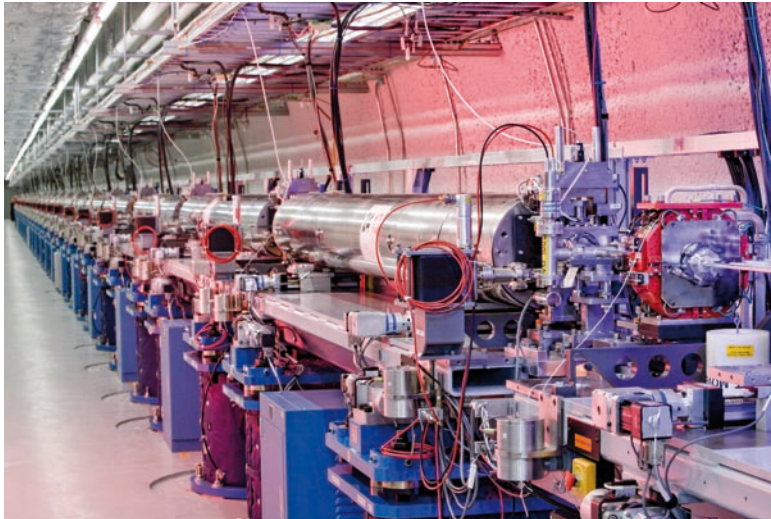


Abb. 2 Aus einem Puls von Elektronen, der sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, erzeugen 33 Undulatoren bei der LCLS intensives Röntgenlicht.

de von den Atomen auf die Membran zu übertragen. Dann wird sich zeigen, wie quantenmechanisch sich dieser Mikroszillator verhalten kann.

### Ausgehöhlte Atome

Der gegenwärtig stärkste Röntgenlaser der Welt, die Linac Coherent Light Source (LCLS), hat Ende 2009 am SLAC in Stanford den Betrieb aufgenommen. Dieser Freie-Elek-

tronen-Laser kann pro Sekunde bis zu 120 Laserpulse erzeugen, die kürzer als 200 fs sind und eine Photonenenergie von 750 eV bis 9 keV haben (Abb. 2). Er erlaubt es, die Struktur einzelner Moleküle mit atomarer Auflösung zu bestimmen. Je nach Energie enthält ein Laserpuls zwischen  $2 \cdot 10^{12}$  und  $2 \cdot 10^{13}$  Photonen. Damit treffen pro Puls hunderte von Photonen auf ein Atom im Laserfokus. Hierbei kommt es zu Vielphotonenprozessen: Das Atom nimmt nach-

einander mehrere Röntgenphotonen auf und wird dabei mehrfach ionisiert. Die weniger intensiven Röntgenstrahlen von Synchrotronstrahlungsquellen können solche Prozesse nicht auslösen. Bertold Krässig vom Argonne National Laboratory berichtete über Ergebnisse von Ionisierungsexperimenten, die seine Kollegen und er an der LCLS durchgeführt haben.

Sie haben untersucht, wie Röntgenphotonen bestimmter Energie nacheinander Elektronen aus Neonatomen heraus schlagen. Dazu analysierten sie die nach jedem Röntgenpuls entstandenen Ionen mit einem Flugzeitmassenspektrometer und nahmen die Energieverteilung der freigesetzten Elektronen auf. Neon hat zehn Elektronen, wobei die Bindungsenergie für die 1s-Elektronen 870 eV ist, für die 2s- und 2p-Elektronen 48,5 eV bzw. 21,6 eV. Photonen mit einer Energie von 800 eV schlugen nacheinander bis zu acht Hüllenelektronen los, sodass ein- bis achtfach ionisiertes Neon entstand. Bei einer Photonenenergie oberhalb von 870 eV stieg die Ionisierungswahrscheinlichkeit stark an, und das Photon hat bevorzugt ein 1s-Elektron herausgelöst. In Atomen mit solch einer 1s-Leerstelle fand ein Auger-Prozess statt: Innerhalb weniger Femtosekunden ging ein Elektron aus der Hülle in die 1s-Leerstelle über; mit der dabei freiwerdenden Energie löste sich ein weiteres Elektron aus der Hülle. Solange die Energie der Röntgenphotonen über der 1s-Bindungsenergie lag, die mit fortschreitender Ionisierung des Atoms zunahm, und solange noch Hüllenelektronen vorhanden waren, wiederholten sich die 1s-Ionisierung und der Auger-Prozess. Anschließend wurden verbliebene Hüllenelektronen herausgeschlagen, sodass wiederum hochionisiertes Neon auftrat. Wie die Atome sich über die verschiedenen Ionisierungszustände verteilten, stimmte mit den Vorhersagen der Theorie überein.

Photonenpulse mit ausreichender Intensität und Energien von mehr als 993 eV konnten aus den Neonatomen beide 1s-Elektronen heraus schlagen, bevor

### SAMOP-DISSERTATIONSPREIS



Christian Groß (Mitte) erhielt in Dresden den Dissertationspreis der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (links der Leiter des Fachverbands Quantenoptik und Photonik, Ferdinand Schmidt-Kaler, rechts DPG-Präsident Wolfgang Sandner).

Groß hat in seiner Promotionsarbeit gequetschte Zustände in einem Bose-Einstein-Kondensat erzeugt und mit diesen ein nichtlineares Atominterferometer realisiert, das die „klassische“ Messgrenze um 15 Prozent übertrifft.

Fotoatelier Konvex



Abb. 3 Dieses Glasstück aus Caesarea (Israel) aus dem 5. oder 6. Jahrhundert n. Chr. wurde mittels konfokaler Röntgenmikroanalyse an Bessy II untersucht.

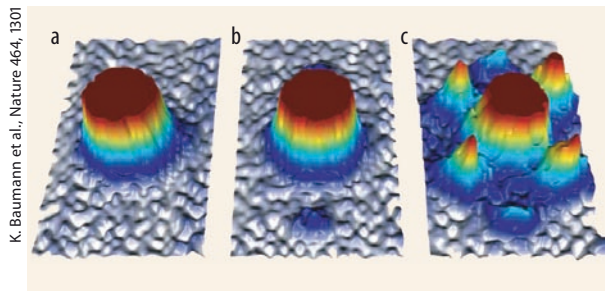
der Auger-Prozess einsetzte. Durch Zweiphotonenabsorption entstanden „hohle“ Neonatome, die Bertold Krässig und seine Kollegen zum ersten Mal beobachtet haben. Bei diesen Atomen war die Wahrscheinlichkeit, Photonen zu absorbieren, stark verringert. Sie waren gewissermaßen transparent für die Röntgenstrahlung geworden. Erst nachdem ein Auger-Prozess stattgefunden hatte und ein Elektron aus der Atomhülle in eine der 1s-Leerstellen gewechselt war, haben die Atome wieder verstärkt Photonen absorbiert. Sehr kurze und intensive Röntgenpulse könnten die Atome eines Moleküls „aushöhlen“ und ihre Elektronenhüllen zumindest so lange vor der Ionisation durch nachfolgende Röntgenpulse schützen, bis man mit ihnen die Struktur des Moleküls durch Röntgenbeugung bestimmt hat. Bevor mehrfache Auger-Prozesse das Molekül im Laserfokus explodieren lassen, wäre es möglich, es atomgenau zu vermessen.

### Physikalische Kunstanalyse

Mit Röntgenstrahlung lassen sich wertvolle historische Objekte und Kunstwerke untersuchen, ohne von ihnen Proben entnehmen zu

müssen oder sie anderweitig zu beschädigen (Abb. 3). Diese Analysen liefern Erkenntnisse, die für den Erhalt von Kunst- und Kulturgütern von großer Bedeutung sind, wie Birgit Kanngießer von der TU Berlin berichtete. In der archäologischen und kunsthistorischen Forschung geht es oft darum, Herkunft und Entstehungszeit von Objekten zu bestimmen bzw. ein Kunstwerk einem Künstler zuzuschreiben oder Fälschungen zu entdecken. In all diesen Fällen sind Informationen über die räumliche Struktur und chemische Zusammensetzung des jeweiligen Gegenstandes nötig, wie sie die konfokale Röntgenanalyse liefern kann. Dazu wird Röntgenstrahlung, die im mobilen Einsatz von einer Röntgenröhre oder stationär von einer Synchrotronstrahlungsquelle wie BESSY in Berlin kommt, mit einer Polykapillarlinse auf das Objekt fokussiert. Eine zweite Kapillarlinse, deren Fokus den Fokus der anregenden Röntgenstrahlung schneidet, fängt die daraufhin entstehende charakteristische Röntgenstrahlung auf. Daraus ergeben sich Informationen über die chemische Zusammensetzung des Objekts mit einer räumlichen Auflösung von 10 – 30  $\mu\text{m}$ , sodass sich aufeinanderfolgende Schichten von einigen  $\mu\text{m}$  Dicke unterscheiden lassen.

Birgit Kanngießer präsentierte einige Beispiele für Objekte, die ihre Kollegen und sie mit konfokaler Röntgenmikroanalyse untersucht haben. Die sog. Moghul-Miniaturen wurden vom 16. bis zum 19. Jahrhundert in Nordindien gemalt und später oft kopiert. Um die Originale von den Kopien zu unterscheiden, haben die Berliner Forscher die verwendeten Pigmente und die Schichtstruktur der Miniaturen analysiert. Dabei stellte sich u. a. heraus, dass bei alten Miniaturen die Figuren nicht auf den Untergrund gemalt sind, und die Bilder nur aus einer Farbschicht bestehen. Neuere Miniaturen hingegen sind mehrschichtig, wobei die Grundschrift oft Zink enthält, was bei älteren Miniaturen nicht der Fall ist. Auf diese Weise war es möglich, eine angeblich aus dem 17.



**Abb. 4** An einem BEC, das sich zwischen den Spiegeln eines Hohlraumresonators befindet, lässt sich der Dicke-Quantenphasenübergang beobachten: Zunächst zeigt sich die erwartete Impulsverteilung eines Kondensats in einer stehenden Lichtwelle (a, b). Erreicht die Pumpintensität einen kritischen Wert, setzt die Selbstorganisation der Atome ein, und ihre Impulsverteilung offenbart zusätzliche Komponenten (c).

Jahrhundert stammende Miniatur aus dem Besitz der Staatlichen Museen Berlins auf das 19. Jahrhundert umzudatieren.

Die Röntgenmikroanalyse kann verborgene Schäden an Kunstwerken aufdecken: Mittelalterliche Hinterglasmalereien sind von völliger Zerstörung bedroht, wenn sich zwischen dem Glas und der aufgetragenen Farbe eine korrodierte Schicht bildet, von der sich die Farbe schließlich ablöst. Hier zeigte die Analyse, an welchen Stellen eines Hinterglasmalerei die Korrosion eingesetzt hatte, sodass man diese rechtzeitig konservieren oder restaurieren konnte. Außerdem ließ sich feststellen, welche chemischen Elemente aus der Farbschicht in das Glas diffundiert waren. Abschließend erwähnte Birgit Kanngießer eine noch laufende Untersuchung der Schriftrollen vom Toten Meer. Diese Pergamentmanuskripte u. a. mit Texten aus dem Alten Testament sind teilweise über 2200 Jahre alt. Hier gibt die Röntgenmikroanalyse

Aufschluss über den Herstellungsprozess und kann z. B. Spurenelemente aus dem Wasser nachweisen, das bei der Herstellung des Pergaments verwendet wurde. Daraus lassen sich, dank der Physik, Schlüsse über seine Herkunft ziehen.

### Vielteilchen-Quantensimulator

Wie man mit ultrakalten atomaren Gasen in Lichtgittern komplexe Modelle der Vielteilchenphysik verwirklichen oder Quantenphasenübergänge beobachten kann, beschrieb Tilman Esslinger von der ETH Zürich. Das Fermi-Hubbard-Modell spielt eine Schlüsselrolle bei der Beschreibung der elektronischen Eigenschaften von Festkörpern. An ihm lassen sich neben metallischen Leitern auch Supraleiter, Bose-Einstein-Kondensate, Antiferromagnete und Mott-Isolatoren erforschen. Der Kopplungsparameter  $J$  beschreibt bei diesem Modell, wie die Elektronen zwischen be-

nachbarten Gitterplätzen tunneln. Zwei auf einem Gitterplatz sitzende Elektronen haben eine Wechselwirkungsenergie  $U$  und entgegengesetzten Spin. Das kollektive Verhalten der Elektronen hängt davon ab, wie viele Elektronen im Mittel auf einen Gitterplatz kommen.

Esslinger und seine Mitarbeiter haben das Fermi-Hubbard-Modell mit fermionischen Kalium-40-Atomen in einem dreidimensionalen Lichtgitter nachgebildet. Die Atome spielten die Rolle der im Kristall tunnelnden Elektronen, wobei zwei verschiedene atomare Zeeman-Zustände den elektronischen Spinzuständen entsprachen. Die Tunnelkopplung  $J$  wurde durch die Intensität des Lichtgitters bestimmt, die Wechselwirkungsenergie  $U$  über Feshbach-Resonanzen mit Magnetfeldern reguliert. Bei schwacher gegenseitiger Abstoßung ( $0 < U/J \leq 12$ ) der Atome war ein großer Teil der Gitterplätze mit zwei Atomen belegt. Die übrigen, weniger stark besetzten Plätze haben die Atome genutzt, um sich durch das Gitter zu bewegen. Bei starker Abstoßung ( $U/J \geq 28$ ) saß auf jedem Gitterplatz genau ein Atom. Dadurch verloren die Atome ihre Beweglichkeit, und es bildete sich ein fermionischer Mott-Isolator, den Esslinger und seine Mitarbeiter 2008 erstmals beobachtet hatten. Inzwischen haben sie den Grad der Doppelbesetzung sowohl gemessen als auch mit Mean-Field-Methoden und Hochtemperaturnäherungen verglichen. Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmten die Ergebnisse überein. Die für das Fermi-Hubbard-Modell erwartete antiferromagnetische Spinordnung konnten die Forscher an Atomen in Lichtgittern noch nicht beobachten, da die bisher erreichte Entropie pro Atom noch zu groß war.

### HERBERT-WALTHER-PREIS

Für seine bahnbrechenden Arbeiten, mit denen er die theoretischen Grundlagen für das Gebiet der Quantenoptik gelegt hat, erhielt Marlan O. Scully (Mitte) den Herbert-Walther-Preis 2011.

Links auf dem Bild steht Christopher Dainty, Präsident der Optical Society of America, rechts DPG-Präsident Wolfgang Sandner.



An einem Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidium-87-Atomen haben Esslinger und seine Mitarbeiter erstmals einen „Dicke-Quantenphasenübergang“ beobachtet, bei dem die Atome ihre räumliche Anordnung selbst organisierten und in eine superradiante Phase übergingen (Abb. 4). Das Kondensat befand sich zwischen den Spiegeln eines Hohlraumresonators in einer stehenden Laserlichtwelle, die senkrecht zur Resonatorachse ausgerichtet war. Resonator und Lichtwelle waren rotverstimmt gegen eine bestimmte Anregungsfrequenz der Atome. Zunächst streuten die Atome die Laserphotonen unabhängig voneinander in alle Richtungen. Überschritt die Laserintensität einen kritischen Wert, so bildete sich im Resonator eine stehende Lichtwelle aus. Durch Interferenz der beiden zueinander senkrechten Lichtwellen entstand ein schachbrettförmiges Lichtgitter, das die Atome in den Bereichen hoher Intensität festhielt. Dadurch wurde dem anfänglich homogenen Kondensat ein Schachbrettmuster aufgeprägt, das wiederum die Streuung des Laserlichts in den Resonator bewirkte. Auf dem Schachbrettgitter saßen die Atome entweder nur auf den weißen oder nur auf den schwarzen Feldern. Da Quantenschwankungen der Resonatormode und der atomaren Dichte diese Symmetriebrechung hervorgerufen haben, ging sie mit einem Quantenphasenübergang einher. Das suprafluide Kondensat nahm eine kristalline Struktur an und wurde dadurch „suprasolid“.

## Superaufgelöste Zellen

Die Möglichkeiten der Lichtmikroskopie sind längst nicht ausgeschöpft. Lange glaubte man, die Lichtbeugung würde die mikroskopische Auflösung grundsätzlich auf die halbe Wellenlänge des benutzten Lichtes beschränken. Demnach wären gerade die „submikroskopischen“ Details in lebenden Zellen, die für ein Verständnis der zellulären Vorgänge entscheidend sind, für die Lichtmikroskopie

unzugänglich. Doch in den letzten Jahren sind verschiedene supraauflösende fluoreszenzmikroskopische Verfahren entwickelt worden, die die Beugungsgrenze durchbrechen. Sie nutzen einzelne fluoreszierende Moleküle, die sich an bestimmte Zellstrukturen setzen, als punktförmige und sehr genau lokalisierbare Lichtquellen. Markus Sauer von der Universität Würzburg stellte ein besonders leistungsfähiges und relativ einfach einzusetzendes Verfahren vor, das seine Mitarbeiter und er entwickelt haben: dSTORM oder „direct stochastic optical reconstruction microscopy“.

Das dSTORM-Verfahren verwendet Farbstoffmoleküle, die sich optisch schalten lassen. Angeregt von einem Laser fluoresziert solch ein Molekül im angeschalteten Zustand. Ein Mikroskop sammelt das Fluoreszenzlicht und lenkt es auf einen Detektor, wo ein einige hundert Nanometer großer Lichtfleck als Bild des Moleküls entsteht. Tritt ein Fleck isoliert auf, so rührt er von einem einzelnen Farbstoffmolekül her. Die gemessene Intensitätsverteilung des Flecks lässt sich durch eine zweidimensionale Gauß-Funktion annähern. Die Position ihres Maximums, aus der die Position des Moleküls folgt, ist dabei viel genauer bekannt als es der Breite der Gauß-Glocke entspricht. Die Position ist umso präziser zu bestimmen, je mehr Fluoreszenzphotonen zum Lichtfleck beigetragen haben. Mit 1000 Photonen erreicht die Genauigkeit etwa 10 Nanometer!

Normalerweise leuchten viele Farbstoffmoleküle gleichzeitig auf, sodass sich auf dem Detektor zahlreiche Lichtflecken überlagern. In

diesem Fall ist es nicht möglich, die Position der Moleküle ultragenau zu bestimmen. Das dSTORM-Verfahren löst dieses Problem dadurch, dass durch einen Lichtpuls bestimmter Wellenlänge fast alle Farbstoffmoleküle in Gegenwart von thiolhaltigen Reduktionsmitteln reversibel in einen nichtfluoreszierenden Zustand übergehen, in dem sie bis zu eine Sekunde lang bleiben. Anschließend bringt sie die Oxidation mit dem im Wasser der Zelle gelösten molekularen Sauerstoff wieder in den fluoreszierenden Zustand zurück. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass immer nur sehr wenige, zufällig über die Zelle verteilte Farbstoffmoleküle zur gleichen Zeit fluoreszieren. Auf dem Detektor treten deshalb nur wenige isolierte Lichtflecke auf, sodass sich die Positionen der jeweils leuchtenden Moleküle auf etwa 20 nm genau ermitteln lassen. Dieser Prozess wird etwa 1000 Mal wiederholt, wobei zufallsbedingt immer andere Moleküle aufleuchten. Auf diese Weise entsteht nach und nach ein hochauflösendes Bild der Zellstrukturen, auf denen die Farbstoffmoleküle sitzen (Abb. 5). Markus Sauer und seine Kollegen haben gezeigt, dass dSTORM mit vielen in der Zellforschung eingesetzten Standardfarbstoffen unter physiologischen Bedingungen funktioniert, ohne die Zellen zu schädigen. So konnten die Forscher die Dynamik von Histonproteinen in den Kernen lebender menschlicher Zellen mit einer Auflösung von 20 nm verfolgen und dabei Bewegungen mit Geschwindigkeiten von 3 nm/s sichtbar machen.

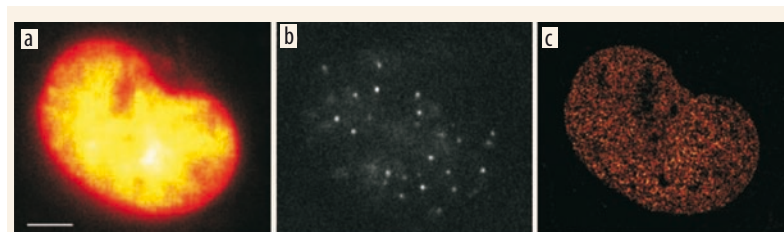


Abb. 5 Angeregt bei 405 nm fluoreszieren Histonproteine so stark, dass die einzelnen Strukturen der Zelle nicht zu erkennen sind (a). Der Maßstab ist 5 µm lang. Die gleiche Zelle bleibt bei einer Anregungswellenlänge von 532 nm na-

hezu dunkel (b). Das d-STORM-Bild setzt sich aus 10 000 Einzelbildern zusammen (c) und zeigt bei einer Anregung von 405 nm einzelne Zellstrukturen mit einer Auflösung von rund 20 nm.