

Um nun auch direkte Aussagen über die Zeitentwicklung des abgeschirmten Coulomb-Potentials zu erhalten, erzeugten Leitenstorfer und seine Mitarbeiter mit einem intensiven 10-fs-Laserpuls ein Plasma in einem GaAs-Kristall. Zur Diagnose strahlten sie anschließend den Spektrometer-Puls ein und registrierten die Feldamplitude hinter dem Kristall für verschiedene Verzögerungen zwischen Anregungspuls und Diagnose-Puls. Aus Veränderungen in Amplitude und Phase konnten die Wissenschaftler die dielektrische Funktion des Halbleiters ablesen, aus der sich alle Eigenschaften eines Festkörpers ergeben. Erst nach einer Verzögerungszeit von etwa 100 fs bildete sich eine scharfe Resonanz bei der erwarteten Frequenz von 15 THz heraus. Das entspricht bei  $10^{18}$  angeregten Ladungsträgern  $\text{pro cm}^3$  etwa der Zeit einer vollen Plasmaschwingung. Kurz nach der Interband-Anregung dominiert nackte Coulomb-Streuung. Diese geht dann äußerst schnell in eine abgeschirmte Coulomb-Streuung über, die vor allem durch Energiequanten der Plasmasoszillation bei 15 THz vermittelt wird.

Mit diesem Experiment konnte erstmals direkt der Aufbau von Vielteilchen-Korrelationen und -Wechselwirkungen auf der Femtosekundskaala gezeigt werden. Die neuen Ergebnisse und die vorgestellte experimentelle Technik eröffnen ein weites Feld zur Untersuchung von niederenergetischen Anregungen in Materie mit einer zeitlichen Präzision nahe am Limit der Unschärfe-Relation. Mit Spannung ist zu erwarten, wie mit dieser Methode innerhalb der nächsten Jahre wichtige zeitaufgelöste Analysen beispielsweise von Gerüstschwingungen großer Moleküle und biologischer Komplexe, oder auch von Korrelationen in Supraleitern gelingen werden.

HARALD GIESSSEN

- [1] R. A. Kaindl et al., *Science* **287**, 470 (2000)
- [2] R. Huber et al., *Nature* **414**, 286 (2001).
- [3] R. Huber et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3191 (2000)
- [4] L. Bányai et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 882 (1998)
- [5] W. A. Hügel et al., *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3313 (1999)

Prof. Dr. Harald Gießen, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn, Wegelerstraße 8, 53115 Bonn

## Ein einzelnes Ion als optischer Detektor

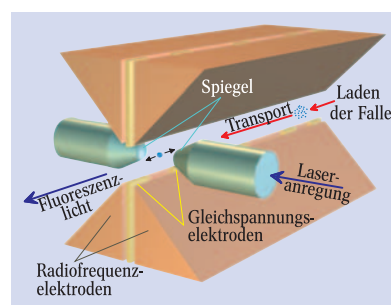
Ein einzelnes Ion lässt sich mit elektromagnetischen Feldern in sogenannten Ionenfallen für nahezu unbegrenzte Zeit speichern. Wenn man es mit Laserlicht kühlt, kommt seine Bewegung praktisch zum Stillstand. Ein solches Teilchen stellt ein fast perfektes System für atomphysikalische und quantenoptische Untersuchungen dar. Hochpräzise Messungen von Übergangsfrequenzen, die zu neuen Atomuhren führen können [1, 2], oder Untersuchungen zur statistischen Verteilung des emittierten Lichtes nach Laseranregung [3, 4] sind Beispiele aus der jüngsten Zeit.

Der Nutzen eines einzelnen gespeicherten Ions als hochauflösender Detektor für ein optisches Feld wurde jüngst in einer Arbeit aus dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching von der Arbeitsgruppe von H. Walther demonstriert [G. R. Guthörlein et al., *Nature* **414**, 49, (2001)]. Hier wurde ein einzelnes  $\text{Ca}^+$ -Ion in einer linearen Paul-Falle gespeichert. Diese besteht aus vier stabförmigen Elektroden, an die ein elektrisches Hochfrequenzfeld angelegt wird. Die Kräfte auf das Ion in diesem Hochfrequenzfeld speichern das Ion in radialer Richtung. Ein Herauslaufen aus der Falle in longitudinaler Richtung wird durch das Anlegen einer positiven Gleichspannung an den Enden der linearen Falle verhindert. Wenn die Bewegung des Ions durch Einstrahlen von geeignetem Laserlicht gekühlt wird, kann seine Position auf ca. 60 nm genau kontrolliert werden.

In dem Experiment aus Garching wurde nun das einzelne gespeicherte Ion in einem optischen Resonator platziert. Um ein Bedampfen der Spiegeloberflächen beim Laden der Falle aus einem Atomstrahl zu vermeiden, wird das Ion zunächst in einem ca. 25 mm entfernten Teil der Ionenfalle erzeugt und dann in den optischen Resonator transferiert (Abb. 1). Dieser besteht aus zwei hochreflektierenden Spiegeln, die sich im Abstand von 6 mm senkrecht zur Achse der linearen Falle gegenüberstehen. In diesem Resonator bilden sich stehende Lichtwellen, wenn Laserlicht längs seiner Achse eingekoppelt wird. Im vorgestellten Experiment wurde dazu eine Wellenlänge von 397 nm

verwendet. Dies entspricht einem Resonanzübergang des  $\text{Ca}^+$ -Ions. Das Licht diente gleichzeitig zur Ionenkühlung. Wenn das Ion ein Photon aus diesem Lichtfeld absorbiert, wird dieses Photon kurze Zeit darauf wieder emittiert und kann detektiert werden. Da für schwache Lichtintensitäten die Absorptionswahrscheinlichkeit proportional der Intensität ist, ist der Betrag der Fluoreszenz ein Maß für die Intensität des Lichtfeldes.

Durch Verändern der Position des Ions im optischen Resonator lässt sich nun die Struktur des Lichtfeldes ausmessen. Dies geschieht in Richtung der Käfigachse



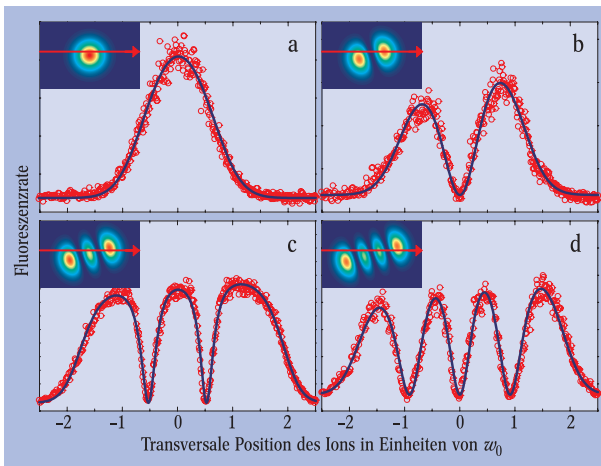
**Abb. 1:** Lineare Ionenfalle mit optischem Resonator. An vier stabförmigen Elektroden wird eine hochfrequente (300 MHz) Wechselspannung zur Ionen Speicherung in radialer Richtung angelegt. In axialer Richtung werden die Ionen durch eine positive Gleichspannung an den Enden der Falle gespeichert. Die Spiegel des optischen Resonators haben einen Abstand von 6 mm. Der ganze Resonator kann durch Piezoelemente in verschiedene Richtungen verschoben werden. Auf diese Weise wird das Ion als Sonde relativ zu den Resonatormoden bewegt. Das Fluoreszenzlicht gibt Aufschluss über die Intensitätsverteilung.

durch Änderung der longitudinalen Speicherspannung. In den Richtungen senkrecht zur Käfigachse wird der optische Resonator durch Piezoelemente verschoben.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für eine solche Messung in der Richtung senkrecht zur Achse des Resonators und der Falle, in der verschiedene Resonatormoden sichtbar werden. Solche Messungen waren bisher mit einer Auflösung von ca. 100 nm möglich, indem ein einzelnes Molekül auf ein Substrat aufgebracht und in das optische Feld eingeführt wurde. Das Molekül dient dabei als Sonde. Das Substrat kann jedoch Licht streuen, beugen oder absorbieren und dadurch die zu beobachtenden Felder stören. Ein einzelnes Ion, wie es in diesem Experiment verwendet wird, ist die kleinste denkbare Probe und führt zu einer störungsfreien Vermessung des Lichtfeldes. Die bisher erreichte räumliche Auflösung von 60 nm lässt sich weiter steigern, indem das Ion einerseits durch stär-

kere Fallenpotentiale besser lokalisiert wird, andererseits die Kühlung bis in den Grundzustand der Schwingung im näherungsweise harmonischen Fallenpotential erfolgt. Damit sollte man deutlich unter 10 nm Auflösung kommen.

Die hohe Auflösung und minimale Störung bei der Vermessung von Lichtfeldern sind nur eine Anwendung, die sich aus dem beschriebenen Experiment ergibt. Die Kombination von nahezu perfekter Kontrolle sowohl der atomaren Position als auch des optischen Feldes erlaubt auch neue Experimente zur Hohlraum-Quantenelektrodynamik, die die fundamentale Wechselwirkung atomarer Systeme mit dem



**Abb. 2:** Intensitätsprofile des Lichtfeldes im optischen Resonator in transversaler Richtung, aufgenommen durch Verschieben des gespeicherten Ions. Die Verschiebung ist in Einheiten der Strahltaile  $w_0$  des Lasers angegeben. Im Experiment war  $w_0 = 24 \mu\text{m}$ . Die vier Teilbilder entsprechen den Resonatormoden  $\text{TEM}_{00}$  (a),  $\text{TEM}_{01}$  (b),  $\text{TEM}_{02}$  (c) und  $\text{TEM}_{05}$  (d).

elektromagnetischen Feld eines Resonators beschreibt. Die Kopplung des Ions an das Feld des Resonators lässt sich nun gezielter kontrollieren, und störende statistische Fluktuationen dieser Kopplung werden reduziert. Darüber hinaus kann nicht nur, wie im vorliegenden Fall, ein einzelnes Ion in das Lichtfeld eingebracht werden, sondern es können entlang der Fallenachse mehrere Ionen in einer linearen Kette mit variablem Abstand gespeichert werden. Wenn der Abstand dieser Ionen mit dem Abstand der Intensitätsmaxima der Resonatormoden übereinstimmt, führt dies zu einer quantenmechanischen Verschränkung der ionischen Zustände. Dies ist die Voraussetzung zur Realisierung von Prozessoren für Quanteninformationssysteme.

GÜNTHER WERTH

Prof. Dr. Uwe Kreibitz, I. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen, Abt. Cluster-Physik, Sommerfeldstraße 14, 52056 Aachen

Prof. Dr. Günther Werth, Institut für Physik, Staudingerweg 7, 55099 Mainz

- [1] J. von Zanthier et al., Opt. Comm. **166**, 57 (1999)
- [2] Th. Udem et al., www.arXiv.org physics/0101029
- [3] J. T. Höffges et al., Opt. Comm. **133**, 170 (1997),
- [4] H. Walther, Phys. Bl., Juli/August 1998, S. 625

## Wann ist Gold ein Metall?

**Forscher aus Ulm, Basel und Essen haben gezeigt, dass Proben mit Clustern aus 55 Gold-Atomen metallische Eigenschaften haben können.**

Gold-Nanopartikel sind die wohl frühesten Produkte künstlicher Nanostrukturierung: Schon römische Künstler verwendeten sie als Farbpigmente in Goldrubinglas [1]. Die wissenschaftliche Untersuchung von Nanopartikeln fand bei Faraday einen ersten Höhepunkt. Und im Jahr 1925 brachten Gold-Nanopartikel Zsigmondy den Nobelpreis ein – heute würden wir sagen: den ersten Nobelpreis für Nanotechnologie.

Moderne Anwendungen von Gold-Partikeln reichen von der heterogenen Katalyse bis hin zu medizinischen Markersystemen. Als Farbpigmente haben sie kommerziell nur noch Nischenbedeutung. Für die Wissenschaft sind nanometergroße Gold-Cluster auch heute noch faszinierend: In diesem Größenbereich vollzieht sich der Übergang vom molekül- zum festkörperartigen Verhalten [1, 2].

Lässt man nämlich einen Cluster Atom für Atom wachsen, dann geht das elektronische Energiespektrum von stark mit der Zahl der Atome variierenden diskreten Molekülbanden in eine Bandstruktur über, die schließlich der des massiven Goldes entspricht. Erst mit der Gitterstruktur bildet sich eine Oberfläche aus.

Wie genau dieser Übergang vor sich geht, ist noch immer ein Geheimnis und wird in der Literatur kontrovers diskutiert [2]. Er ist wohl kaum als wohldefinierter „Phasenübergang“ anzusehen; eher handelt es sich um einen langwierigen Weg über verschiedene Zwischenzustände, der auch von der Umgebung und der Oberfläche der Cluster abhängt: Wenn die Oberfläche zusätzlich chemisch modifiziert ist – etwa durch Adsorbate, Chemisorbate, Substrate oder Matrixeinbettung – werden die Verhältnisse viel komplizierter. Eine detaillierte Klassifizierung ist ange-

bracht. Physiker und Chemiker der Universitäten Ulm, Basel und Essen haben jetzt gezeigt, dass Proben mit Gold-Clustern aus 55 Atomen bereits metallischen Charakter aufweisen, wenn deren stabilisierende Liganden entfernt werden [3].

Für die Cluster-Forschung war es ein spektakuläres Ereignis, als Schmid et al. vor nun 20 Jahren erstmals auf chemischem Wege unter Alltagsbedingungen stabile und massenselektierte Gold-55-Cluster erzeugten [1]: nur 55 Gold-Atome pro Cluster, und das in Milligramm-Mengen! Man konnte Cluster einheitlicher Form und Größe, die sich sonst zumeist nur unter Ultrahochvakuumbedingungen herstellen ließen, ohne Schaden auf ein Blatt Papier schütten!

Diese Cluster haben eine kuboktaedrische Form. Aber wieso genau 55 Atome? Die 55 ist im Modell der dichten Kugelpackung eine „geometrisch magische“ Zahl besonders hoher Packungsdichte und Bindungsstärke: Um ein Zentralatom bilden sich zwei vollgepackte Schalen, eine mit 12 und die nächste mit 42 Atomen. Dieses neuartige Material hatte allerdings auch einen großen Nachteil.

Bedingt durch die riesige Oberflächenenergie – verglichen mit der gleichen Menge massiven Goldes –, verschmelzen solche Teilchen mit sauberer Oberfläche, sobald sie sich auf atomarem Abstand berühren, weil dadurch ein Teil der Energie abgebaut wird.

Die Annäherung der nur 1,44 nm großen Au-Teilchen musste also zuverlässig unterbunden werden. Das ließ sich nur durch einen großen Aufwand erkaufen, und zwar durch die chemische Anbindung von molekularen Abstandshaltern – so genannten Liganden – wie Chlor und Triphenylphosphin ( $\text{PPh}_3$ ). Diese chemisch gebundenen Partner wirken aber nicht nur als Abstandshalter, sondern – und das ist der Kaufpreis – sie üben auch einen starken Einfluss auf die Struktur und die elektronischen Eigenschaften des Au-Kerns aus [1, 2].

Die Abbildung zeigt ein Molekül der metallorganischen Verbindung  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ . In diesem Cluster kommen Gold-Atome in vier unterschiedlichen Umgebungen vor: zum einen im Volumen und zum anderen an der Oberfläche mit Au-, P- bzw. Cl-Nachbarn.

Wie viele Gold-Atome aber sind erforderlich, um Festkörpereigen-