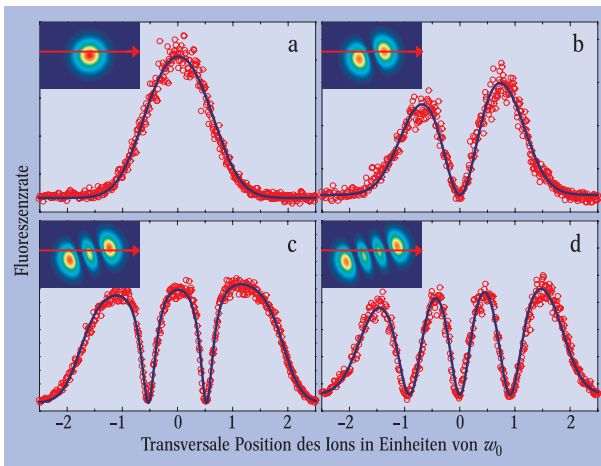


kere Fallenpotentiale besser lokalisiert wird, andererseits die Kühlung bis in den Grundzustand der Schwingung im näherungsweise harmonischen Fallenpotential erfolgt. Damit sollte man deutlich unter 10 nm Auflösung kommen.

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.

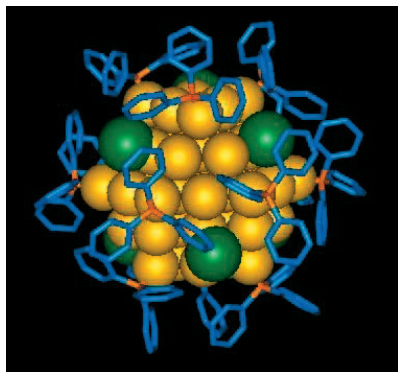
Bedingt durch die riesige Oberflächenenergie – verglichen mit der gleichen Menge massiven Goldes –, verschmelzen solche Teilchen mit sauberer Oberfläche, sobald sie sich auf atomarem Abstand berühren, weil dadurch ein Teil der Energie abgebaut wird.

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-

schaften ähnlich dem massiven Gold zu zeigen? Die deutsch-schweizerische Forschungsgruppe wendete diese spannende Frage in eine experimentell leichter zugängliche [3]: Reichen die 55 Atome der  $\text{Au}_{55}$ -Cluster aus, um die metallischen Eigenschaften des Goldes zu erhalten? Die Wissenschaftler fan-



$\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ -Cluster haben keine metallischen Eigenschaften, wie wir sie vom Massivmaterial her kennen. Sobald jedoch die Cl-Atome (grün) durch Röntgen-Bestrahlung von den Au-Atomen (gelb) entfernt werden, zeigen Proben mit solchen Clustern ein dem Massivmaterial ähnliches Verhalten [3]. In weiterführenden Experimenten könnten bald „nackte“ Gold-Cluster untersucht werden, da sich die stabilisierenden Phenylringe (blau), die über ein P-Atom (orange) gebunden sind, und die Cl-Atome (grün) seit kurzem auch auf chemischem Wege entfernen lassen [4].

den heraus, dass die sechs Cl-Atome bei der Ausbildung Massivmaterial-ähnlicher metallischer Eigenschaften eine gravierende Rolle spielen. Als Kriterium diente die elektronische Zustandsdichte bei der Fermi-Energie  $E_F$  der Gold-Cluster: Liegt die dem kristallinen Festkörper eigene elektronische Bandstruktur vor, dann weist eine hohe Zustandsdichte bei  $E_F$  auf ein teilweise mit Elektronen gefülltes Leitungsband hin – ein charakteristisches Merkmal für Metalle.

Um die Zustandsdichte zu erhalten, untersuchten die Autoren die Gold-Cluster mithilfe von UV- und Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (UPS bzw. XPS). Mit diesen Verfahren lässt sich die Bindungsenergie herausgeschlagener Photoelektronen messen. Ergebnis: Die Cluster zeigten kein dem Massivmaterial ähnliches metallisches Verhalten!

Boyen et al. wiederholten die Experimente, nachdem sie zuvor durch *zusätzliche* Röntgenbestrahlung künstlich Strahlungsschäden verursacht hatten. Auf diese Weise entfernten sie die Cl-Atome nach-

weislich von der Cluster-Oberfläche. Dagegen blieben Hinweise auf die C-Atome aus den Phenylgruppen erhalten. Bei diesem Versuch tauchte sowohl im XPS-Valenzbandspektrum als auch im UPS-Spektrum eine deutliche, auf die Existenz metallischer Eigenschaften hindeutende Stufe bei der Fermi-Energie auf. Sie ähnelt der Stufe, die zum Vergleich an einer Goldmetall-Schicht gemessen wurde.

Boyen et al. interpretierten den Zusammenhang zwischen dem Verschwinden des stark elektronegativen Chlors und dem Auftreten der Struktur bei der Fermi-Energie als einen klaren Hinweis dafür, dass die Bindungen von sechs Au-Grenzflächenatomen mit den Cl-Atomen die Eigenschaften der 55 Au-6s-Elektronen so drastisch verändern, dass die bekannten metallischen Eigenschaften von Gold im intakten  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$  nicht mehr nachweisbar sind.

In welchem Zwischenzustand auf der Skala zwischen Molekül und Festkörper mögen sich die Liganden-stabilisierten  $\text{Au}_{55}$ -Cluster aber dann befinden? Molekulare Strukturen, wie sie in ähnlich stabilisiertem  $\text{Au}_{13}$  im optischen Spektrum beobachtet werden, sind bei dem  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ -Molekül verschwunden. Aber auch eine Plasmonenresonanz, kennzeichnend für metallisches Verhalten, hat sich noch nicht ausgebildet [2].

Ein Experiment, bei dem sowohl die Phosphin- als auch die Chlor-Liganden auf *chemischem* Wege entfernt wurden, ist unlängst gelungen [4]. Die dann „nackten“  $\text{Au}_{55}$ -Cluster bildeten überraschenderweise ein regelmäßiges Cluster-Supergitter aus! Man kann gespannt sein auf die ersten Untersuchungen dieser Systeme, z. B. mit Photoelektronen-Spektroskopie-Methoden, wie sie die Autoren von [3] angewendet haben.

UWE KREIBIG

- [1] G. Schmid (Hrsg.), Clusters and Colloids – From Theory to Applications, Wiley-VCH, Weinheim 1994
- [2] U. Kreibig, M. Vollmer, Optical Properties of Metal Clusters, Springer Series in Materials Science 25, Berlin 1995
- [3] H.-G. Boyen, G. Kästle, F. Weigl, P. Ziemann, G. Schmid, M. G. Garnier, P. Oelhafen, akzeptiert zur Veröffentlichung in Phys. Rev. Lett.
- [4] G. Schmid et al., Chem. Eur. J. 6, 1693 (2000)