

# Kalte Spiegel, heiße Spulen

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

Rainer Scharf

Die Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP) hatte zu ihrer diesjährigen Frühjahrstagung nach Stuttgart eingeladen. Über 2000 Teilnehmer präsentierten in 1035 Vorträgen und auf 703 Postern ihre Arbeiten. Aus der breiten Themenvielfalt bringt die nachfolgende Auswahl einige Highlights.

## Schrödingers Spiegel

Die berühmte Katze, mit der Erwin Schrödinger 1935 die „burlesken“ Konsequenzen der Quantenmechanik für makroskopische Objekte verdeutlichen wollte, ist nicht totzukriegen. Die „Quantenoptomechanik“ soll es ermöglichen, immer massivere Objekte in überlagerte oder verschränkte Quantenzustände zu bringen und diese Zustände zu manipulieren und zu messen. Dabei reicht die Skala von mechanisch schwingenden photonischen Kristallen mit einigen Pikogramm ( $10^{-12}$  g) Masse bis zu den kilogrammschweren Spiegeln in Gravitationswellendetektoren, wie Markus Aspelmeyer von der Universität Wien berichtete.

Ein mechanischer Oszillator verhält sich quantenmechanisch, wenn er nur noch wenige Schwingungsquanten enthält. Dazu muss man ihn nahezu auf seine Grundzustandstemperatur kühlen, die proportional zu seiner Schwingungsfrequenz ist. Leichte, hochfrequente Oszillatoren verhalten sich deshalb eher quantenmechanisch als schwere, langsam schwingende. Zur Abkühlung mechanischer Oszillatoren nutzt man u. a. den Strahlungsdruck des Lichtes. Die Wiener Forscher haben optische Resonatoren hergestellt, die einen feststehenden Spiegel und einen schwingenden Mikrospiegel enthal-



Abb. 1 Optomechanische Strukturen: Die kreisförmigen Spiegel mit etwa 40  $\mu\text{m}$  Durchmesser sitzen auf einem elastischen Balken aus Siliziumnitrid und

schwingen mit MHz-Frequenz. Jeweils einer der Spiegel bildet zusammen mit einem feststehenden Spiegel einen Fabry-Perot-Resonator.

ten (Abb. 1). Der ist Teil eines mechanischen Oszillators und reflektiert die in den optischen Resonator eingestrahlten Photonen, die ihm dabei einen Rückstoß erteilen. Ist die Frequenz des Lichts im Resonator „blauverschoben“, also größer als die Resonatorfrequenz, so treibt das Licht den mechanischen Oszillator an. Ist die Frequenz kleiner oder „rotverschoben“, so entzieht das Licht dem Oszillator Energie und kühlt ihn. Auf diese Weise gelang es, den mechanischen Oszillator auf 1 mK abzukühlen, sodass er etwa 30 Schwingungsquanten oder Phononen enthielt. Zusammen mit der Gruppe von Oskar Painter am Caltech hat die Wiener Gruppe mechanisch schwingende photonische Kristalle mit Licht so weit abgekühlt, dass sie nur noch 0,8 Phononen enthielten (s. SKM-Bericht).

Eine große Herausforderung ist es, einen massiven Oszillator – wie den Resonator mit dem schwingenden Spiegel – in eine Überlagerung von mehreren Quantenzuständen zu bringen, die makroskopisch unterscheid-

baren Positionen entsprechen. Dazu könnte man den Oszillator im Grundzustand mit blauverschobenem Licht anregen. Werden durch die optomechanische Kopplung Phononen schneller erzeugt, als die Photonen den Resonator verlassen, so würden das Licht im Resonator und der mechanische Oszillator in einen verschränkten Zustand gelangen. Durch geeignete Messungen des Resonatorzustands wäre es möglich, den Oszillator in die gewünschte Überlagerung von Quantenzuständen zu bringen.

Einen anderen Vorschlag haben Forscher um Aspelmeyer und Ignacio Cirac vom MPI für Quantenoptik in Garching gemacht. Eine nanometergroße Kugel wird in einer optischen Falle festgehalten und durch Kühlung in ihren Grundzustand gebracht. Nach Abschalten der Falle fällt die Kugel frei, und ihre Wellenfunktion dehnt sich räumlich aus. Nach kurzer Zeit durchquert die Kugel einen Hohlraumresonator, dessen Licht sie in einen Zustand bringt, der die Überlagerung der Ortszustände  $|+x\rangle$  und

VCQ, Universität Wien

$| -x \rangle$  ist. Beim weiteren freien Fall kommt es zu einer beobachtbaren Interferenz dieser Zustände wie beim Doppelspaltexperiment. Entsprechende Versuche laufen bereits. Ziel ist es dabei zu überprüfen, ob die Quantenmechanik uneingeschränkt gilt oder ob eine zusätzlich auftretende Dekohärenz eine Überlagerung von makroskopisch unterscheidbaren Quantenzuständen unterdrückt.

## Quantenreflexe des Heliums

Mit Atomen und Molekülen des Edelgases Helium, die von einer Festkörperoberfläche abprallen, lässt sich die kohärente Quantenreflexion sichtbar machen, berichtete Wieland Schöllkopf vom Fritz-Haber-Institut in Berlin. Ihm und seinen Kollegen gelang es 2010 erstmals, mit atomaren Materiewellen die aus der Optik bekannten Rayleigh-Wood-Anomalien nachzuweisen. Der amerikanische Physiker Robert Wood hatte 1902 beobachtet, dass das von einem Beugungsgitter reflektierte, spektral zerlegte Licht einer weißen Lampe einzelne dunkle und helle Streifen aufwies. Diese Anomalien zeigen sich gerade bei jenen Wellenlängen, für die bei gegebenem Einfallswinkel einer der vom Gitter gebeugten Lichtstrahlen streifend austritt,

wie Lord Rayleigh 1907 herausfand. Die Intensität dieses Strahls wächst unendlich schnell mit dem Einfallswinkel an und verursacht durch diese Resonanz die abrupten Intensitätsänderungen der anderen gebeugten Strahlen.

Die Rayleigh-Wood-Anomalien hatte man auch für weiche Röntgenstrahlen und für Elektronenwellen, die von einer Kristalloberfläche reflektiert wurden, beobachtet. Vor zwei Jahren ließen Schöllkopf und seine Kollegen einen scharf gebündelten Strahl von Heliumatomen streifend von einem Beugungsgitter reflektieren und registrierten die zurückgeworfenen Atome mit einem Detektor. Zunächst änderte sich die Reflexionswahrscheinlichkeit stetig mit dem Einfallswinkel, doch für bestimmte Winkel war die Änderung abrupt: Es traten Rayleigh-Wood-Anomalien auf. Mit diesem Nachweis haben die Forscher die Analogie zwischen der Photonenoptik und der Atomoptik vervollständigt. Da die Ausprägung der Rayleigh-Wood-Anomalien vom Oberflächenpotential abhängt, ist es prinzipiell möglich, detaillierte Informationen über die Wechselwirkung zwischen den Atomen und der sie reflektierenden Oberfläche zu gewinnen.

Überraschendes geschieht, wenn Helium-Dimere ( $\text{He}_2$ ) von einer Metalloberfläche reflektiert wer-

den. Schöllkopf und seine Kollegen haben einen Strahl von 1 mK kalten Heliumatomen, der auch viele der äußerst fragilen Dimere enthielt, auf ein metallisches Beugungsgitter gerichtet und die reflektierten Teilchenstrahlen analysiert. Dabei fanden sie, dass zahlreiche Helium-Dimere die Kollision mit der Oberfläche unbeschadet überstanden hatten. Die Moleküle, deren Bindungsenergie nur  $10^{-7}$  eV beträgt, mussten schon lange vor Erreichen der Oberfläche kehrtgemacht haben. Nähert sich nämlich ein Dimer der Oberfläche auf etwa 1 nm, so fällt es aufgrund der van der Waals-Kraft in eine etwa 5 meV tiefe Potentialmulde und wird dadurch angeregt. Da das Helium-Dimer aber keine gebundenen Rotations- oder Schwingungszustände besitzt, zerbricht es sogleich in einzelne Atome. Wie quantenmechanische Berechnungen zeigten, kehrt das Dimer jedoch mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit schon einige 10 nm vor der Oberfläche um, sodass es nicht zerstört wird. Für sehr langsam heranfliegende Dimere geht diese Wahrscheinlichkeit sogar gegen 100 %. Diese „schonende“ Quantenreflexion haben die Berliner Forscher auch mit  $\text{He}_3$ -Molekülen beobachtet.

## Spins einzeln adressiert

Diamanten werden durch ihre Fehler interessant. Das gilt auch für Stickstofffehlstellen im Diamantkristall, bei denen ein Stickstoffatom zwei benachbarte Kohlenstoffatome ersetzt. Solch eine Fehlstelle verhält sich in gewisser Weise wie ein Molekül. Wird sie mit grünem Licht von 532 nm Wellenlänge angeregt, so fluoresziert sie rot bei etwa 700 nm. Sie trägt einen Spin, der optisch zu adressieren ist. Er lässt sich durch optische Anregung polarisieren, während das Fluoreszenzsignal Informationen über seinen Zustand enthält. Die Fehlstellen-spins in isotoopenreinen Diamanten haben bei Zimmertemperatur eine Kohärenzzeit von mehr als einer Millisekunde. Das macht sie als Qubits für einen Quantencomputer

## SAMOP-DISSERTATIONSPREIS

Gemma De las Cuevas (Mitte) erhielt in Stuttgart den Dissertationspreis der Sektion Atome Moleküle, Quantenoptik und Plasmen von DPG-Präsident Wolfgang Sandner (links) und SAMOP-Sprecher

Matthias Weidemüller. De Las Cuevas hat in ihrer an der U Innsbruck durchgeführten Promotionsarbeit neue Zusammenhänge zwischen der Quanteninformationstheorie und Standardmodellen der Statistischen Physik aufgedeckt und systematisch erforscht. Letztere spielen eine wichtige Rolle als einfache Modellsysteme in



Uni Stuttgart, Grafik- und Fotolabor, W. Strohmaier

verschiedenen Gebieten innerhalb und außerhalb der Physik, wie etwa im Bereich der neuronalen Netze oder der Ökonomie, aber auch in neueren Ansätzen zur Quantengravitation. Ein zentrales Ergebnis ihrer Arbeit ist die Vereinheitlichung einer großen Klasse verschiedenartiger Spin-Modelle der Statistischen Physik.

interessant. Doch dazu ist es erforderlich, die Spins einzeln mit einem Fluoreszenzmikroskop auszulesen. Noch vor wenigen Jahren war dies nicht möglich, da die Lichtbeugung das Auflösungsvermögen dieser Mikroskope begrenzt hat. Doch wie Dominik Wildanger vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen berichtete, gibt es inzwischen Techniken, die die Beugungsgrenze überwinden und die Fehlstellen einzeln abfragen können.

Wildanger erläuterte sein vielversprechendes Verfahren, das die von Stefan Hell in Göttingen entwickelte STED-Mikroskopie (Stimulated Emission Depletion) mit der ODMR-Technik (Optically Detectable Magnetic Resonance) kombiniert. Die STED-Mikroskopie übertrifft die bei etwa 200 nm liegende beugungsbegrenzte Auflösung deutlich (Abb. 2). Bei diesem Verfahren werden die fluoreszierenden Farbstoffmoleküle mit einem ringförmig fokussierten roten Laserstrahl „ausgeschaltet“, d. h. in einen nichtleuchtenden Zustand versetzt. Hingegen kann ein grüner Laserstrahl ein einzelnes Molekül, das im dunklen Zentrum des roten Strahls liegt, zum Leuchten anregen. Auf diese Weise lassen sich einzelne, fluoreszierende Fehlstellen sichtbar machen. Mit den beiden Laserstrahlen tastet man den Diamanten ab und erhält so ein detailreiches Bild der nacheinander fluoreszierenden Fehlstellen. Die STED-Mikroskopie erreicht derzeit eine Auflösung von 6 nm.

Die beiden ungepaarten Elektronen des Stickstoffs an einer Fehlstelle bilden im Grundzustand ein Spintriplett, wobei sich der Zustand  $m = 0$  durch Mikrowellen mit einer Frequenz von 2,8 GHz in die beiden entarteten Zustände  $m = \pm 1$  bringen lässt. Ein äußeres Magnetfeld hebt deren Entartung auf. Die ODMR-Technik nutzt aus, dass der Zustand mit  $m = 0$  deutlich stärker fluoresziert als die Zustände mit  $m = \pm 1$ . Bringt ein Mikrowellenpuls bestimmter Frequenz die Fehlstelle aus diesem Zustand in einen der beiden anderen Zustände, so zeigt sich diese Resonanz an der Verrin-

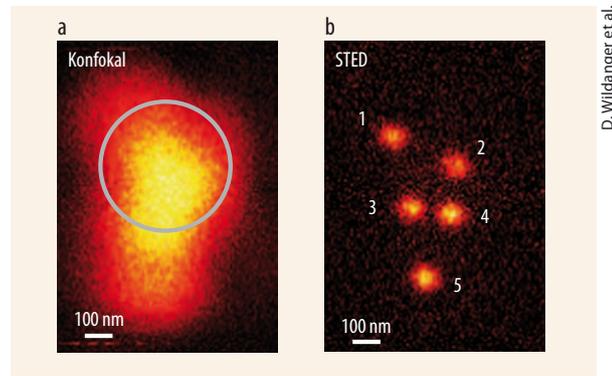


Abb. 2 Einzelne Spins im Blick: Während die konfokale Mikroskopie die fünf dicht beieinander liegenden Stickstofffehlstellen nicht auflösen kann, sind sie auf dem STED-Bild gut zu erkennen.

gerung des Fluoreszenzsignals. Mit dem STED-Verfahren kann man im Rahmen der erreichten Auflösung sicherstellen, dass immer nur jeweils eine Fehlstelle zur Fluoreszenz angeregt wird. Wie Wildanger und seine Kollegen gezeigt haben, lässt sich mit STED-ODMR der Spinzustand einer bestimmten Fehlstelle abfragen. Allerdings stört der rote Laser, der die Fluoreszenz der benachbarten Fehlstellen unterdrückt, deren Spins durch eine zusätzliche Phase. Es bleibt also noch einiges zu tun, ehe einzelne Fehlstellenspins als Qubits dienen können.

### Nanofasern fangen Atome

Wie man neutrale Atome mit einer extrem dünnen lichtleitenden Glasfaser fängt und an das Licht ankoppelt, erklärte Arno Rauschenbeutel von der TU Wien. Seine Kollegen und er haben herkömmliche Glasfasern erhitzt und so in die Länge gezogen, dass sie im mittleren Teil nur noch etwa 500 nm dick waren. Durchstrahlt man solch eine Faser mit Licht, dessen Wellenlänge größer als der Faserdurchmesser ist, so wird ein erheblicher Teil des elektromagnetischen Feldes außerhalb der Faser als evaneszente

Welle geführt. Je größer die Lichtwellenlänge ist, desto kürzer ist die Distanz, in der das Feld in radialer Richtung abklingt. Indem die Forscher mehrere Lichtwellen durch die Faser laufen ließen, erzeugten sie ein elektromagnetisches Feld, mit dem sie Cäsiumatome nahe der Faser festhalten und anregen konnten (Abb. 3).

Durch die Faser schickten die Forscher eine linear polarisierte Lichtwelle mit 780 nm Wellenlänge, während sie mit zwei dazu orthogonal polarisierten infraroten Lichtstrahlen von 1064 nm Wellenlänge eine stehende Lichtwelle in der Faser erzeugten. Aus einer magneto-optischen Falle ließen sie ultrakalte Cäsiumatome nahe der Faser entweichen, sodass die Atome die evaneszenten Felder der Faser spürten. Bezogen auf die D-Linien-Übergänge des Cäsiums bei 894 nm und 852 nm war die stehende Lichtwelle rot- und die laufende Welle blauverstimmt. Dadurch wirkten auf die Atome anziehende bzw. abstoßende Dipolkräfte. Deren Zusammenspiel führte dazu, dass die Atome rund 200 nm von der Faser entfernt in etwa 0,4 mK tiefen Potentialtöpfen gefangen wurden, die wie in einer Perlenkette parallel zur Faser in einem gegenseitigen

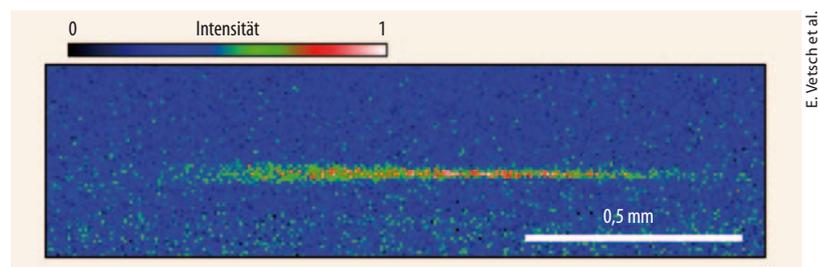


Abb. 3 Fluoreszenzaufnahme von etwa 2000 Cäsiumatomen, die mit dem in einer Nanofaser durch Lichtwellen erzeugten elektromagnetischen Feld gefangen wurden.

Abstand von rund 500 nm aufgereiht waren. Jeder Topf konnte maximal ein Atom aufnehmen.

Die gefangenen Atome wirkten ihrerseits auf einen durch die Faser geschickten resonanten Sondenstrahl zurück. So reichten 2000 Atome aus, um die Ausbreitung des Lichts in der Faser fast vollständig zu unterdrücken. Zwischen einem verstimmten Sondenstrahl in der Faser und den gefangenen Atome kam es auch zu einer starken dispersiven Wechselwirkung, wobei schon ein einzelnes Atom die Phase der Lichtwelle um bis zu 1 mrad veränderte. Dadurch wurde es möglich, mit nichtresonantem Licht die Zahl der in der Falle sitzenden Atome absorptionslos zu messen.

Die Atome in den Potentialtöpfen eignen sich auch als Quanteninformationsspeicher, die über Glasfasern gekoppelt sind und sich zu einem Netzwerk verknüpfen lassen. Rauschenbeutel und seine Kollegen haben ihre Nanofasern auch zu Fabry-Perot-Resonatoren gemacht, indem sie den Brechungsindex in den dicken Faserendstücken periodisch modulierten und auf diese Weise mit einem Bragg-Spiegel versahen. Falls es gelingt, diesen Resonator mit den von der Nanofaser festgehaltenen Atomen zu kombinieren, erhalte man eine ungewöhnlich starke Kopplung zwischen den Atomen und dem Licht im Resonator. Die Nanofasern eröffnen damit vielversprechende Möglichkeiten für Anwendungen in der Quantenoptik.

## Fusion mit kontrollierten Moden

Die technische Nutzung der Kernfusion ist eines der ehrgeizigsten Zukunftsprojekte der Menschheit. Der sichere Einschluss und die thermische Isolation eines 100 Millionen Grad heißen Plasmas, wie es zur Verschmelzung von Deuterium und Tritium nötig ist, wirft noch immer viele Probleme auf. Doch es gibt Fortschritte, wie der Bericht von Wolfgang Suttrop vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching über Experimente am Tokamak ASDEX Upgrade zeigte. Ein Tokamak schließt das Plasma mit einem ringförmigen Magnetfeld ein, das außerhalb des Plasmas von Magnetspulen und in ihm durch einen induzierten elektrischen Strom erzeugt wird. Je besser der Wärmeeinschluss des Plasmas ist, umso kleiner und kompakter kann der Reaktor sein. Die in sich geschlossenen Feldlinien würden ein laminar strömendes Plasma einschließen, doch die auftretende Turbulenz führt zu einem Transport senkrecht zu den Feldlinien. Unterdrückt eine Scherströmung die Turbulenz am Rande des Plasmas, verbessert sich der Einschluss. Die dabei auftretenden High-Confinement-Moden haben Plasmaphysiker in Garching vor 30 Jahren entdeckt.

Diese H-Moden gehen jedoch mit einem extrem hohen Druckgradienten am Plasmarand einher, der zu Instabilitäten führt. Es treten „Edge-localized Modes“ (ELMs) auf, die den zum Plasmarand gerichteten Teilchen- und Wärmestrom für einige 100  $\mu$ s

enorm anwachsen lassen. Zwar kühlt sich das Plasma dabei ab und wird wieder stabil, doch an der Wand des Tokamaks können Wärmebelastungen von 100 MW/m<sup>2</sup> auftreten, denen auch die widerstandsfähigsten Materialien nicht gewachsen sind: Auskleidungen aus Graphit werden abgetragen, und Wände aus Wolfram schmelzen. Das alles verunreinigt das Plasma. Doch Plasmaphysiker in San Diego gelang es vor sechs Jahren, das Auftreten der ELMs zu unterdrücken. Dazu störten sie das toroidale Magnetfeld eines Tokamaks durch ein schwaches Radialfeld mit helikaler Symmetrie, woraufhin die ELMs verschwanden.

Nun sind Wolfgang Suttrop und seine Kollegen in Garching den ELMs zu Leibe gerückt, indem sie acht Störfeldspulen in das Vakuumgefäß des Tokamaks ASDEX Upgrade eingebaut haben (Abb. 4). Bei zunächst abgeschalteten Spulen wurde das Plasma in eine H-Mode gebracht, die etwa 40-mal in der Sekunde einen ELM zeigte. An den Divertoren, die das Plasma von Fremdatomen reinigen, stieg mit jedem ELM die Wärmebelastung sprunghaft auf das Vierfache an. Auch an den Behälterwänden aus Wolfram nahm die Beanspruchung zu, sodass der Wolframgehalt des Plasmas anstieg. Wurden aber die vier Spulen eingeschaltet, so verschwanden die ELMs nach kurzer Zeit, und die Energie des Plasmas schwankte nur noch wenig. Die Wärmebeanspruchung der Divertoren verringerte sich auf weniger als ein Viertel, und auch die Verunreinigung des Plasmas ging dramatisch zurück. Die Forscher untersuchten, wie die Spulenfelder die ELMs unterdrücken. Anders als bisher angenommen, scheint dabei die „Ergodisierung“ des Magnetfeldes am Plasmarand, bei der eine von den Spulen verursachte Resonanz die Magnetfeldlinien durcheinanderwirbelt und dadurch eine Plasmainstabilität verhindert, keine Rolle zu spielen. Experimente mit einer größeren Zahl von Spulen sollen hier Klarheit schaffen.

W. Suttrop et al.

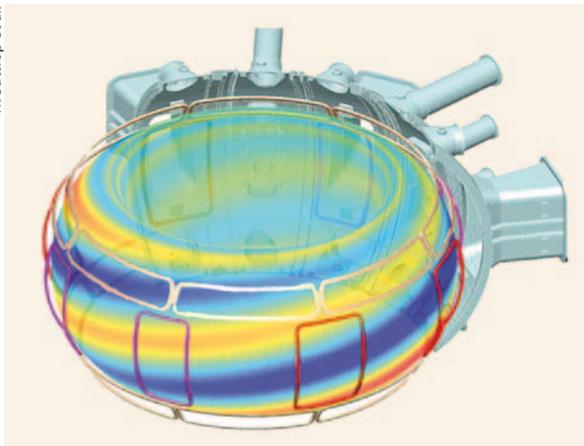


Abb. 4 Drei Reihen mit je acht Störfeldspulen im Vakuumgefäß des Tokamaks ASDEX Upgrade. Dem Bild überlagert ist die Darstellung eines Magnetfeldes mit einer toroidalen Modenzahl  $n \leq 4$ .