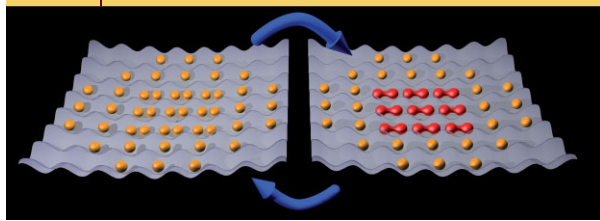


QUANTENOPTIK

Chemische Reaktion perfekt kontrolliert

Physiker am Max-Planck-Institut für Quantenoptik können das Zustandekommen einer chemischen Bindung zwischen zwei Atomen voll kontrollieren. Dabei kommt es zu quantenmechanischen Oszillationen zwischen ungebundenen Atompaaaren und gebundenen Molekülen [1].

ABB. 1 | OPTISCHES GITTER



Atompaaare in einem optischen Gitter oszillieren zwischen einem ungebundenen Zustand (gelb) und einem chemisch gebundenen Molekülzustand (rot) hin und her.

Bei dem Wort chemische Reaktion denken viele Menschen an ein Gemisch verschiedener Substanzen in einem Reagenzglas. Erwärmt man das Ganze mit einem Bunsenbrenner, so ändern sich Farbe oder Konsistenz, und vielleicht stinkt und kracht es sogar. Aus dem Studium solch schlichter Phänomene ist im Laufe der Zeit die viel subtilere, moderne Chemie hervorgegangen. Seit etwa achtzig Jahren weiß man, dass chemische Bindungen durch die Quantenmechanik quantitativ erklärt werden können. Inzwischen gelingt es, den

Ablauf komplizierter, chemischer Prozesse auf Quantenniveau aufzuklären, beispielsweise im Falle der Photosynthese in Pflanzen oder katalytischer Prozesse an Oberflächen. Die Beobachtung eines Quantenphänomens ist allerdings eine Sache – seine gezielte Steuerung hingegen eine ganz andere.

Kürzlich demonstrierte unsere Gruppe die vollständige quantenmechanische Kontrolle über eine einfache, chemische Reaktion, nämlich die Assoziation zweier Atome zu einem Molekül [1].

Als Ausgangspunkt dient ein Gas aus Rubidiumatomen mit einer Temperatur von etwa 50 nK ($5 \cdot 10^{-8}$ K), das ein Bose-Einstein-Kondensat bildet. In diesem System kommt es gelegentlich vor, dass zwei Atome miteinander stoßen. Während des Stoßes kann vorübergehend ein gebundener Molekülzustand besetzt werden. Durch Anlegen eines Magnetfelds geeigneter Stärke kann erreicht werden, dass die Energie des Molekülzustands exakt der Energie des ungebundenen Atompaars gleich ist. Dieses Zusammentreffen der Energien nennt man Feshbach-Resonanz. Fernab der Resonanz ist die Besetzung des Molekülzustands wegen Energieerhaltung vernachlässigbar, auf der Resonanz kann sie aber merklich werden.

Um wirklich viele Moleküle zu erhalten, ist es vorteilhaft, jedem Atom schon im Voraus einen Partner zuzuweisen. Zu diesem Zweck wird das Gas zunächst in ein optisches Gitter geladen. Das ist eine räumliche elektrische Potentiallandschaft, die mit Laserlicht erzeugt wird und deren Minima und Maxima in Form eines kubischen Gitters angeordnet sind. Beim Laden des Gitters werden

die Atome so verteilt, dass ein großer Teil der Gitterplätze je genau zwei Atome enthält. Jeder Gitterplatz kann dabei als harmonischer Oszillator genähert werden, dessen quantenmechanischer Grundzustand durch die Atome besetzt wird. Damit ist die Bewegung der Atome unter voller Kontrolle.

Schaltet man jetzt das Magnetfeld ein, so wissen die Atompaaare nicht mehr, ob sie im ungebundenen oder im gebundenen Zustand vorliegen sollen. Sie oszillieren als Funktion der Zeit zwischen diesen beiden Zuständen hin und her (Abbildungen 1 und 2). Das Einschalten des Magnetfelds definiert einen Anfangszeitpunkt, zu dem die gesamte Population in Form ungebundener Atompaaare vorliegt. Daher oszilliert die Population an allen Gitterplätzen in Phase. Bis zu 29 Oszillationsperioden wurden im Experiment beobachtet.

Durch Ausschalten des Magnetfelds kann die chemische Reaktion zu einem beliebigen Zeitpunkt angehalten werden. Insbesondere kann damit eine Ausbeute von über 90 % im molekularen Zustand erzielt werden.

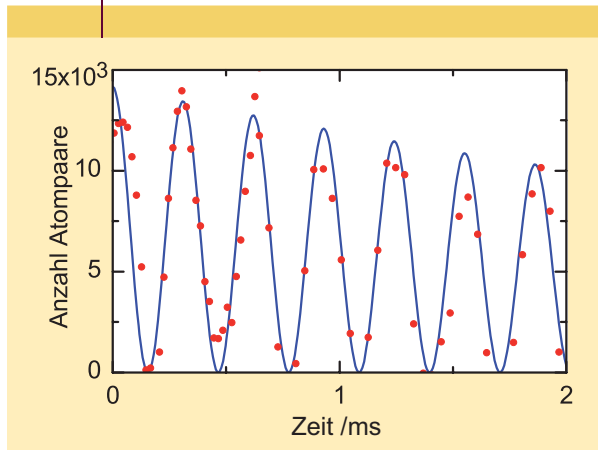
Die beobachteten Oszillationen sind typisch für ein gekoppeltes quantenmechanisches Zwei-Niveausystem. Sie zeigen, dass tatsächlich volle Kontrolle über den quantenmechanischen Zustand des Systems erzielt wird und dass während der Oszillation eine kohärente Überlagerung des ungebundenen und des gebundenen Zustands vorliegt.

Mögliche Anwendungen liegen im Bereich von Präzisionsexperimenten. So wird seit langem darüber diskutiert, ob die Feinstrukturkonstante wirklich konstant ist. Würde diese sich zeitlich langsam verändern, so würde das zu einer Änderung der hier gemessenen Oszillationsfrequenz führen.

[1] N. Syassen et al., Phys. Rev. Lett. **2007**, 99, 033201.

Stephan Dürr,
MPI für Quantenoptik, Garching.

ABB. 2 | MESSERGEBNIS



Die Zahl der ungebundenen Atome oszilliert sinusförmig als Funktion der Zeit. Die restliche Population liegt in Form gebundener Moleküle vor. (rot: Messdaten, blau: Theorie)