

## QUANTENOPTIK

## Atomkühlung mit Lichtresonatoren

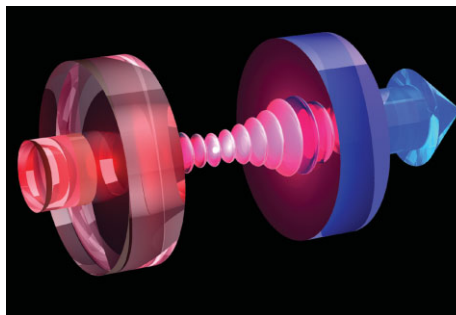
*Alle bisherigen Verfahren zur Kühlung eines atomaren Gases funktionieren grundsätzlich nicht bei Molekülen. Eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching hat kürzlich eine neue Methode entwickelt, mit der sich einzelne Atome zwischen zwei Spiegeln abbremsen lassen. Diese ist auch auf Moleküle anwendbar [1].*

Alle bisherigen Verfahren zur Kühlung eines atomaren Gases mit Licht beruhen darauf, dass die gerichteten Photonen eines Laserstrahls von den Atomen in unterschiedliche Richtungen gestreut werden. Der mit der Richtungsänderung verbundene Rückstoß der Photonen führt zu einer Bremskraft, die dem Gas Wärme entzieht. Die Richtungsänderung ist aber auch erforderlich, um die nach den Gesetzen der Thermodynamik notwendige Entropieabnahme des Gases bei der Abkühlung zu kompensieren: Die dem Gas fehlende Entropie wird von den zufällig gestreuten Photonen aufgenommen. Daher wurde bisher davon ausgegangen, dass dieser Streuprozess für die Laserkühlung wichtig ist.

Es zeigt sich allerdings, dass die Entropiezunahme des Lichtfeldes die Entropieabnahme des Gases überwiegt. Grundsätzlich besteht daher die Möglichkeit, effizientere Kühlverfahren mit kleinerem Entropieanstieg zu entwickeln.

Ein weiterer Nachteil der konventionellen Laserkühlung besteht darin, dass die Photonen bei der Streuung kurzfristig absorbiert werden und die Atome dabei in einen angeregten Zustand übergehen. Wenn die Atome bei der anschließenden Emission nicht mehr in den Ausgangszustand zurückkehren, kommt der Streuprozess zum Erliegen. Dieser Effekt verhindert die Laserkühlung von Molekülen, die bei der Lichtstreuung leicht in einen anderen Rotations- oder Vibrationszustand übergehen können.

Die neue Kühlmethode beruht auf einem Brechungsindexeffekt, bei dem kein Licht absorbiert wird [2].



**Abb. 1** Stehende Lichtwelle zwischen zwei hoch reflektierenden Spiegeln (nicht maßstabsgerecht). Die Abnahme der Bewegungsenergie des Atoms in diesem Feld beruht auf einer Blauverschiebung des transmittierten Laserstrahls.

Sie benutzt einen optischen Resonator aus zwei hoch reflektierenden Spiegeln, in dem sich ein einzelnes Atom befindet (Abbildung 1). Im Experiment wurden  $^{85}\text{Rb}$ -Atome verwendet. Zwischen den Spiegeln wird ein von außen (in Abbildung 1 von links) kommender Lichtstrahl hin und her reflektiert. Er muss dafür eine ganz bestimmte Wellenlänge aufweisen, die durch den Abstand der Spiegel bestimmt wird. Falls dieser Spiegelabstand ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist, bildet sich im Resonator eine stehende Lichtwelle aus.

Bewegt sich das Atom entlang dieser Stehwelle, verändert es aufgrund seines Brechungsindexes periodisch die optische Weglänge zwischen den Spiegeln – ein Effekt, der einer Änderung des Spiegelabstandes gleich kommt. Der Einfluss des Brechungsindexes ist groß, wenn sich das Atom an einem Bauch der Stehwelle befindet. Am Knoten dagegen verschwindet der Brechungsindexeffekt. Da die Bedingung für das Auftreten einer Stehwelle

vom Brechungsindex abhängt, ändert sich die Wellenlänge des Lichtes, wenn sich das Atom vom Knoten zum Bauch bewegt. Bei geschickter Wahl der Parameter kann man erreichen, dass die Wellenlänge dabei kleiner wird, das Licht also mehr Energie bekommt. Das energiereichere Lichtfeld wird aufgrund der Spiegelverluste aus dem Resonator (nach rechts) ausgekoppelt. Dabei wird das Atom langsamer. Die Entropieabnahme des Atoms wird dadurch kompensiert, dass die Entropie des ursprünglich monochromatischen Laserstrahls durch die Erzeugung neuer Lichtfrequenzen zunimmt.

In den Experimenten konnte das Atom mit Hilfe eines weiteren Lasers auch im Resonator gespeichert werden. Mit der neuen Kühlmethode ließ sich das Atom erstmals an einem Stehwellenbauch im Zentrum eines optischen Resonators gut lokalisieren und die Speicherzeit im Resonator um ein Vielfaches auf bis zu 60 ns im Mittel über viele Atome verlängern. Interessant ist auch, dass für die Kühlung im zeitlichen Mittel bereits ein hundertstel Photon im Resonator ausreicht.

Mit einem im Resonator gut lokalisierten Einzelatom könnte man in zukünftigen Experimenten eine im internen Zustand des Atoms gespeicherte Quanteninformation auf ein Photon übertragen, dieses zu einem zweiten, ähnlich gebauten System schicken und die Information dort in einem anderen Atom wieder abspeichern. So ließe sich eine Quantenschnittstelle zwischen ruhenden und fliegenden Quantenbits realisieren. Das neue Kühlverfahren wird daher auch in zukünftigen Quantennetzwerken aus Atom-Resonator-Systemen Anwendung finden.

[1] P. Maunz et al., Nature **2004**, 428, 50.

[2] P. Horak et al., Phys. Rev. Lett. **1997**, 79, 4974.

Prof. Dr. Gerhard Rempe,  
MPI für Quantenoptik, Garching