

Der Ein-Atom-Laser

Mit großem Erfolg sind in den letzten Jahren immer kleinere Laserlichtquellen entwickelt worden. Daher ist es wichtig, die physikalischen Eigenschaften eines Lasers zu verstehen, der so klein ist, daß nur wenige Atome am Laserprozeß teilnehmen. Nun haben K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari und M. S. Feld am Massachusetts Institute of Technology (MIT) einen Laser realisiert, der mit einzelnen Atomen betrieben wird [1]. Obwohl dieser „Ein-Atom-Laser“ wegen seiner kleinen Ausgangsleistung von 3 pW wahrscheinlich keine praktische Bedeutung haben wird, eignet er sich doch ideal dazu, fundamentale quantenelektrodynamische Fragestellungen zu untersuchen. Der Laser emittiert im nahen infraroten Spektralbereich (791 nm) und schließt an Arbeiten im Mikrowellenbereich an, die H. Walther an der Universität München mit dem Ein-Atom-Maser schon vor einigen Jahren initiiert hat [2].

Wie läßt sich die Wirkungsweise des neuen Ein-Atom-Lasers verstehen? Wir entfernen zunächst die Laserspiegel und betrachten den freien Raum, wo ein angeregtes Atom üblicherweise innerhalb weniger Nanosekunden ein Photon abgibt. Lange hat man geglaubt, daß die „natürliche Lebensdauer“ dieser spontanen Emission nur von den Eigenschaften des jeweiligen Atoms abhängt. Erst vor etwa zwanzig Jahren haben Experimente mit Farbstoffmolekülen auf einem Spiegel gezeigt, daß die natürliche Lebensdauer auch von der Umgebung des Teilchens beeinflusst wird. Vom Standpunkt der klassischen Physik aus betrachtet ist das nicht verwunderlich, da ein strahlendes Atom als oszillierender elektrischer Dipol aufgefaßt werden kann, der nah einer reflektierenden Oberfläche mit seinem eigenen Spiegelbild in Wechselwirkung tritt. Wer einmal mit Radioantennen gearbeitet hat, weiß, daß dieser Effekt zu einer starken Erhöhung oder Unterdrückung der abgestrahlten Leistung führen kann. Allerdings folgen Atome den Gesetzen der Quantenmechanik, und man sollte denken, daß das Atom den Spiegel nur dann „sehen“ kann, wenn es erst einmal ein Photon emittiert hat. Daher stellt sich die Frage, wie das Atom im Fall der unterdrückten Spontanemission den Spiegel „sieht“? Die Antwort ist leicht gefunden: Das Atom „sieht“ den Spiegel über die Vakuumfluktuationen des elektromagnetischen Feldes, die durch die leitende Oberfläche modifiziert werden. In der Tat führt dieser Effekt dazu, daß ein Atom zwischen zwei Spiegeln verstärkten Vakuumfluktuationen ausgesetzt ist, wenn die Spiegel einen mit dem atomaren Übergang resonanten Hohlraum bil-

den. Ein angeregtes Atom gibt seine Energie in diesem Resonator viel schneller ab als im freien Raum. Das Lichtquant wird dabei in die Resonatormode abgestrahlt und nicht in irgendeine andere, zufällige Richtung, wie das im freien Raum der Fall ist. Die Verstärkung des Vakuumfeldes ist in einem kleinen Resonator besonders groß.

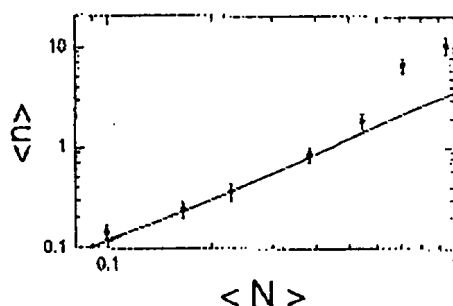


Abb. 1: Mittlere Zahl von Photonen im Resonator (proportional zur Ausgangsleistung), aufgetragen gegen die mittlere Zahl von Atomen zwischen den Spiegeln (proportional zur Pumplleistung). Eine ausgeprägte Laserschwelle fehlt. Modellrechnungen ergeben die durchgezogene Linie (aus [1]).

Das MIT-Experiment ist ein technologisches Meisterwerk, bei dem dielektrische „Superspiegel“ mit einer Reflektivität von 0.999996 (!) verwendet werden, die einen Krümmungsradius von 10 cm haben und sich im Abstand von 1 mm gegenüberstehen. Ein einzelnes Photon wird in diesem Resonator etwa 840 ns lang gespeichert und im Mittel 800 000 mal reflektiert. Das Lasermedium besteht aus einzelnen Bariumatomen, die in einem Atomstrahlröhren 40 cm vom Resonator entfernt verdampft werden. Mit Hilfe eines speziellen π -Pulses aus Laserlicht werden alle Atome in einen angeregten Zustand gepumpt. Dieser hat eine lange Lebensdauer von 3 μ s, so daß die 320 m/s schnellen Atome noch angeregt sind, wenn sie den „Superresonator“ erreichen. Erst dort bewirken die erhöhten Vakuumfluktuationen, daß die Atome ein Photon emittieren können. Der Resonator ist anfänglich leer, und die Atome gehen während der kurzen Durchflußzeit von 250 ns mit 25 % Wahrscheinlichkeit ein Photon ab. Im Mittel werden also vier Atome benötigt, um ein „erstes“ Laserphoton zu erzeugen. Dieses Photon wird zwischen den Spiegeln gespeichert und stimuliert das nächste, kurze Zeit später in den Resonator fliegende Atom zur Emission eines „zweiten“ Photons (mit 50 % Wahrscheinlichkeit). Auf diese Weise baut sich ein Laserfeld auf, das aufgrund von Spiegelverlusten im stationären Betrieb eine mittlere Photonenzahl zwischen 0,14 und 11 aufweist, wenn sich im Mittel zwischen 0,1 und 1 Atom im Resonator befindet (siehe Abbildung).

Von den Autoren durchgeführte Modellrechnungen stimmen bei kleinem Fluß mit den experimentellen Ergebnissen überein. Bei größerer Pumprate emittiert der Laser zuviel Licht, was wahrscheinlich auf den wachsenden Einfluß kollektiver Effekte hindeutet. Es ist eine der verblüffenden Eigenschaften des Ein-Atom-Lasers (wie auch des Ein-Atom-Masers), daß im Gegensatz zum üblichen Laser keine ausgeprägte Laserschwelle existiert [3]. Der Ein-Atom-Laser hat aber den Vorteil, daß sichtbare Photonen direkt beobachtet werden können, während Mikrowellenquanten nur schwer nachzuweisen sind. Allerdings sind im optischen Spektralbereich Resonatoren höchster Güte viel schwerer herzustellen.

Das nichtklassische Feld des Ein-Atom-Masers, das nur indirekt über die Statistik der Atome nachgewiesen werden konnte [4], sollte sich im Ein-Atom-Laser nun direkt beobachten lassen. Außerdem eröffnen sich neue Möglichkeiten, z. B. Zahlzustände mit wohldefinierter Intensität, aber ohne Phaseninformation, zu „sehen“. Vielleicht ist es sogar möglich, die Lichtquanten im Resonator absorptionsfrei zu detektieren und dabei Quantensprünge in der Zahl der Laserphotonen aufzuzeichnen. In der Tat, ein Ein-Atom-Laser mit etwas längerer Durchflußzeit und noch besseren Spiegeln, bei dem ähnlich wie im Ein-Atom-Maser ein einzelnes Atom sein im Resonator gespeichert Photon wiederholt reabsorbieren und emittieren kann [5], stößt die Tür zu vielen aufregenden Experimenten im sichtbaren Bereich auf. Dazu gehören nicht nur die Demonstration eines einfachen Quantencomputers, der das Superpositionsprinzip der Quantenmechanik ausnutzt, um mehrere Rechnungen auf einem „Prozessor“ gleichzeitig auszuführen, sondern auch die bisher rein spekulative Übertragung eines Quantenzustandes durch „Teleportation“, bei der ein pfiffiger Absender die Information über den unbekannten Zustandsvektor eines Teilchens auf klassischem Wege an einen entfernten Empfänger übermitteln kann, ohne dabei das Teilchen selbst auf die Reise zu schicken.

G. Rempe, Konstanz

- [1] K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari, M. S. Feld, Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 3375.
- [2] D. Meschede, H. Walther, G. Müller, Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 551.
- [3] P. R. Rice, H. J. Carmichael, Phys. Rev. A **50** (1994) 4318.
- [4] G. Rempe, F. Schmidt-Kaler, H. Walther, Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 2783.
- [5] G. Rempe, H. Walther, N. Klein, Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 353.