

## EIN TROPFEN LICHT

**Kann Licht kondensieren wie Wasserdampf? In der Quantenwelt ist das tatsächlich möglich. Und mit der richtigen Idee geht es sogar ziemlich einfach, wie Physiker an der Universität Bonn gezeigt haben.**

von Heinz Horeis

Einen Laser, eine verspiegelte Kammer und einen Tropfen Farbstoff – viel mehr braucht die Gruppe um den Experimentalphysiker Martin Weitz für ihren „Lichttropfen“ nicht. Das Herzstück des Versuchs ist die verspiegelte Kammer – ein optischer Resonator mit zwei einander gegenüberliegenden Spiegeln, die eingestrahktes Licht hin und her reflektieren. Diese „Lichtfalle“ ist winzig: Die Spiegel sind wenige Quadratmillimeter groß und kaum mehr als einen Tausendstel Millimeter voneinander entfernt. Mithilfe eines Lasers füllt der Professor am Institut für Angewandte Physik der Universität Bonn den Resonator mit Photonen. Dann gibt er über eine Pipette von oben ein Tröpfchen Farbstoff hinein. Das alles dauert nur Sekundenbruchteile. Spektrometer-Aufnahmen zeigen den Ablauf: Zunächst sieht man einen Lichtkreis, dessen Farbspektrum von grün bis gelb verläuft – nichts Ungewöhnliches. Schlagartig erscheint dann ein großer, hellgelb leuchtender Fleck. Umgeben ist er von diffusem, grün-gelbem Licht. Photonen unterschiedlicher Frequenz sind in eine andere Phase übergegangen – ähnlich wie Wasserdampf, der an einer kalten Fensterscheibe zu Tropfen kondensiert.

Die Bonner Physiker waren die Ersten, die einen solchen Lichttropfen erzeugen konnten. Darin schwingen alle Teilchen mit derselben Wellenlänge – in diesem Fall 585 Nanometer. Auf den ersten Blick ähnelt diese „Superwelle“ Laserlicht. Tatsächlich aber haben die Wissenschaftler einen neuen Zustand im Reich der Quantenwelt erzeugt: ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC).

### HILFE VON ALBERT EINSTEIN

Die Theorie dafür stammt aus den 1920er-Jahren. Damals entstand eine neue Physik, die Quantenmechanik. Einen wichtigen Beitrag dazu lieferte Satyandra Nath Bose, ein junger Physikdozent aus Indien. 1923 verfasste er einen kurzen Artikel zum Planckschen Strahlungsgesetz und zu Einsteins Hypothese der Lichtquanten (Photonen). Darin behandelte Bose Strahlung als eine Ansammlung von Teilchen und entwickelte eine Quantenstatistik, die dieses „Photonengas“ beschrieb.

Das Londoner Philosophical Magazine lehnte eine Veröffentlichung ab. Bose schickte seine Arbeit kurzerhand an Albert Einstein, der sie übersetzte und 1924 in der Zeitschrift für Physik unterbrachte. Ein Jahr später veröffentlichte er selbst einen Artikel, in dem er Boses Idee weiterführte. Das Ergebnis war die Bose-Einstein-Statistik. Mit ihr kann das Verhalten einer Klasse von Teilchen beschrieben werden, die inzwischen Bose zu Ehren Bosonen genannt wird (siehe Kasten „Bosonen und Fermionen“).

### verschränkte TEILCHEN

Bose schrieb über masselose Photonen, Einstein über ein Gas aus Teilchen mit Ruhemasse. Das Bose-Gas, so nahm Einstein an, sei gesättigt, das heißt, es kann keine Teilchen mehr aufnehmen. Was geschieht, so fragte sich Einstein, wenn weitere Teilchen hinzugefügt werden, die Temperatur aber konstant bleibt? Seine Antwort: Oberhalb einer bestimmten Teilchenzahl gehen immer mehr Teilchen in den, wie er schrieb, „1. Quantenzustand (Zustand ohne kinetische Energie)“ über. Ein Teil kondensiert, ein Teil bleibt ein gesättigtes Gas. Dieses von Einstein vorhergesagte Kondensat heißt heute Bose-Einstein-Kondensat (BEC).

Der Phasenübergang funktioniert im Prinzip wie bei Wasser, wo Wärmebewegung und

gegenseitige elektrische Anziehung konkurrieren. Sinkt die Temperatur von Wasserdampf, bewegen sich die Moleküle darin langsamer. Ab einer bestimmten Temperatur überwiegt die Anziehungskraft, und die Wassermoleküle schließen sich zu Ketten zusammen: Der Dampf kondensiert. Bei der Bose-Einstein-Kondensation gibt es keine elektrische Anziehung. Dort gilt aber ein bizarres Gesetz der Quantenwelt, das Physiker „Entanglement“ nennen: Die Teilchen sind so miteinander verschränkt, dass sie als Einheit wirken. Diese Quantenverschränkungen sind Gegenspieler der thermischen Bewegung. Da sie sehr schwach sind, müssen die Atome oder Moleküle extrem stark gekühlt werden. Erst dann kann sich ein Bose-Einstein-Kondensat bilden.

Phasenübergänge gehören für Physiker längst zum Alltagsgeschäft. In den Anfangstagen der Quantenmechanik fand Einsteins rein quantenstatistischer Phasenübergang allerdings wenig Zustimmung. Auch er selbst war skeptisch. „Die Theorie ist hübsch“, schrieb er einem Kollegen im Dezember 1924, „aber ob auch etwas Wahres dran ist?“

### **kälter als zwischen den sternern**

Als Einstein noch zweifelte, hatten die Physiker sich gerade an Energiequanten, Photonen und Materiewellen gewöhnt. Konzepte wie Bosonen und Fermionen, Teilchenspin oder Quantenstatistik waren allerdings noch unbekannt. Sie wurden erst in den folgenden Jahren entdeckt, ebenso Wolfgang Paulis Ausschließungsprinzip (siehe Kasten rechts, „Bosonen und Fermionen“). Damit ausgerüstet konnten Physiker immerhin guten Gewissens behaupten, dass ein BEC aus Bosonen – theoretisch – möglich ist.

Den praktischen Nachweis erlebte Einstein nicht mehr. Erst 1995, 40 Jahre nach seinem Tod, gelang es Physikern in den USA, das erste Atomkondensat herzustellen. Vorher fehlten dazu die technischen Voraussetzungen. Die größte Herausforderung war die Temperatur. Das atomare Gas musste kälter sein als alles, was die Physiker bis dahin erreicht hatten, kälter selbst als das Gas im Weltraum zwischen den Sternen. Erst dann friert die Bewegung der Atome so stark ein, dass diese massenhaft in den Grundzustand übergehen und kondensieren.

Anfang der 1990er-Jahre war die Technik soweit. Mit Laserkühlung und magnetischer Falle machten sich ein paar Physiker daran, Atome festzuhalten und so stark zu kühlen, dass sie kondensierten. Zwei Gruppen konkurrierten um das erste BEC: das Team von Carl Wieman und Eric Cornell an der University of Colorado in Boulder sowie eine Gruppe am Massachusetts Institute for Technology (MIT), die der Heidelberger Physiker Wolfgang Ketterle leitete. Die Nase vorn hatten am Ende Cornell und Wieman: Im Juni 1995 erzeugten sie das erste BEC aus einem Rubidium-Gas, das sie auf 170 Nanokelvin gekühlt hatten. Die MIT-Gruppe folgte vier Monate später, allerdings mit einem Kondensat, das einige Hundert Mal mehr Atome enthielt.

Einstein hatte also Recht behalten: Beim Unterschreiten einer kritischen Temperatur gingen die ungeordneten Rubidium-Atome in einen grundsätzlich neuen Materiezustand über. Sie sammelten sich auf dem niedrigsten Energieniveau, Einsteins erstem Quantenniveau, und marschierten im Gleichschritt – ähnlich wie die Photonen des Laserlichts. Für diesen „Atomlaser“ erhielten Cornell, Wieman und Ketterle 2001 den Nobelpreis für Physik. Auch Photonen zählen, wie viele Atome, zur Klasse der Bosonen und sind deshalb, im Prinzip, BEC-fähig. Jedoch: Ein Atom besitzt Masse. Ein Photon hat hingegen die Ruhemasse Null. Es könnte daher nicht existieren, wenn es sich nicht bewegen würde. Wie sollte man es da „einfrieren“ können? Doch es gibt Hintertüren in der Quantenwelt.

### **Mathematische Ungereimtheiten**

Der Erste, der daran rüttelte, war der deutsche Physik-Professor Eberhard Müller. Mitte der 1980er-Jahre stieß er auf Ungereimtheiten in der mathematischen Behandlung der Photonenenergie. Zwar würden Photonen im freien Raum verschwinden, wenn sie abkühlen, nicht aber in einem Hohlraum mit reflektierenden Wänden. „Hier ist der tiefste Energieeigenwert der Photonen positiv, also ungleich Null“, erklärt Müller. „Kondensation bedeutet dann, dass dieser Zustand makroskopisch besetzt wird.“ Makroskopische Besetzung heißt, dass sich zahlreiche Photonen, alle mit der gleichen Wellenlänge, auf dem tiefsten Energieniveau zu einer einzigen Welle vereinigen.

Ein Photonen-BEC, so Müllers Schlussfolgerung, sei also möglich. Zwei wissenschaftliche Arbeiten veröffentlichte er dazu 1985 und 1987. Außerdem erwarb er noch ein Patent auf die Nutzung des Verfahrens zur Gewinnung von Solarenergie. Viele der Kollegen hielten seine Idee allerdings für „baren Unsinn“. Elektromagnetische Strahlung in einem Hohlraum, so die herrschende Lehrmeinung, würde von den Wandatomen rasch absorbiert. Die Photonen verschwänden einfach.

Anfang der 1990er-Jahre bemühte sich eine kleine Gruppe an der ETH Zürich um die „Photonenkondensation“, allerdings erfolglos. An der University of California in Berkeley machte sich Ende der 1990er-Jahre eine weitere Gruppe ans Werk. Ihr Leiter war Raymond Chiao, ein ausgezeichnete Experimentalphysiker auf dem Gebiet der Quantenoptik. Chiao Team ließ Photonen in einem Resonator aneinander streuen. Rubidium-Atome sollten diese Streuprozesse verstärken. Die Experimentatoren konnten wechselwirkende Photonen erzeugen, doch kamen sie, so Chiao, „niemals so weit wie die Bonner Gruppe“.

### **SIEBENJÄHRIGER ANLAUF**

Immerhin, Chiao's Arbeiten waren hilfreich, als Martin Weitz vor sieben Jahren begann, sich mit dem Photonen-BEC zu befassen. Da hatte er bereits viele Erfahrungen in Laserphysik, Atom- und Quantenoptik gesammelt. Er forschte am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei Nobelpreisträger Theodor Hänsch. In Tübingen befasste er sich mit Quantencomputern, Atomlasern, Atom-Springbrunnen und Atominterferometrie. Daneben arbeitete er an vier experimentellen Ansätzen zum Photonen-BEC.

Das letzte Experiment, das jetzt den Durchbruch erzielte, begann vor drei Jahren. Im Wesentlichen ist es die Doktorarbeit von Jan Klärs, der auch der Hauptautor des wissenschaftlichen Fachartikels dazu ist. „Zwei technische Tricks haben den Erfolg gebracht“, ist Weitz überzeugt: Zum einen war es die Verwendung eines Resonators mit gekrümmten Spiegeln – im Gegensatz zu den ebenen Spiegeln, die Chiao's Gruppe benutzte. Durch die Krümmung sammeln sich mehr Photonen im Zentrum der Lichtfallen-Kammer. Zweitens, und dies war entscheidend, benutzte das Team Farbstoffmoleküle, um die Photonen zu „thermalisieren“ – das heißt, um sie in ein Wärmegleichgewicht zu bringen. Chiao's Gruppe hatte vergeblich versucht, diese Abkühlung über die gegenseitige Streuung der Photonen zu erreichen.

### **photonen-crash mit farbstoff**

Die Photonen kollidierten mit den Farbstoffmolekülen, wurden absorbiert und wieder ausgestoßen. Dabei kühlten sie sich auf die Temperatur des Farbstoffs ab, also quasi auf die Raumtemperatur, ohne dabei zu verschwinden. „Eine untere Grenze im Resonator“, erklärt Weitz, „sorgt für die Erhaltung der Photonenanzahl.“ Das bedeutet: Kühlt ein Photon ab, so nimmt seine Wellenlänge zu, allerdings nur bis zu dieser Grenze. Größere Wellen passen räumlich nicht in den Resonator.

Der Abstand zwischen den Spiegeln legt diese Grenze fest: Er entspricht der halben Wellenlänge der Photonen (auch ein Vielfaches der halben Wellenlänge wie im Bonner Experiment ist möglich). Diese Grenze bildet den Grundzustand mit einer Photonenenergie größer Null, wie von Eberhard Müller vorhergesagt. Hier entsteht das Kondensat.

### **ein VÖLLIG NEUES LICHT**

Nur ein Teil der Photonen kondensiert, derzeit immerhin bis zu 90 Prozent. „Wir haben eine ausgeprägte Spitze, eine scharfe Frequenz, bei der die Photonen im Gleichschritt sind“, sagt Weitz. „Daneben gibt es aber noch ein Photonengas mit unterschiedlichen Frequenzen.“ Das unterscheidet ein Photonenkondensat deutlich von einem Laser. Ohnehin sind beide Lichtquellen grundsätzlich verschieden: Das photonische BEC befindet sich im thermischen Gleichgewicht, während beim Laser die Photonen die energetisch höheren Zustände besetzen.

Um im Laser diese sogenannte Besetzungsumkehr zu erreichen, muss viel Energie aufgewendet werden, und zwar umso mehr, je höher die Frequenz des Laserlichts ist. Das bietet Chancen für das Photonenkondensat. „Wir glauben, dass wir mit dem Photonen-BEC Licht im Gleichschritt bei kürzeren Wellenlängen erzeugen können als mit einem Laser“, meint Weitz. Er denkt dabei an kohärente Lichtquellen im Ultraviolett- oder Röntgenbereich, mit denen sich sehr kleine Halbleiterstrukturen erzeugen lassen. Variiert werden könnte die Wellenlänge durch die Wahl eines geeigneten Mediums oder durch die Änderung der Spiegelabstände.

Derzeit bauen die Bonner Farbstoffmoleküle in festes Material ein. Das ist praktikabler als flüssiger Farbstoff und geht bereits in Richtung Anwendung. Wohin sich das Photonenkondensat entwickeln wird, ist Weitz zufolge schwer vorherzusagen. Aber wer weiß: Vielleicht lösen die Bonner Physiker mit ihrer Entdeckung einen ähnlichen Boom aus wie vor 16 Jahren die Entdecker des atomaren BEC. Auf diesem Feld arbeiten inzwischen weltweit über 180 Forschungsteams. ■

HEINZ HOREIS, regelmäßiger Autor für bild der wissenschaft, ging bei den Recherchen für diesen Artikel mehrmals ein Licht auf.

---

## GETRENNT ODER BEISAMMEN

---

Unsere Welt besteht aus zwei grundverschiedenen Teilchenklassen: Fermionen (links) besetzen nacheinander die einzelnen Energieniveaus (dargestellt durch die schwarzen Linien) bis zur maximalen Energie  $E_F$  (Fermi-Energie). Die Niveaus entsprechen unterschiedlichen Quantenzuständen. Bosonen (rechts) können sich dagegen im Grundzustand ansammeln, dem niedrigsten Energieniveau, und bilden dann dort ein Bose-Einstein-Kondensat.

---

## GUT ZU WISSEN: BOSONEN UND FERMIONEN

---

Sämtliche Teilchen lassen sich in Fermionen und Bosonen einteilen. Zu welcher Klasse ein Teilchen gehört, hängt von einer Quantenzahl ab: dem Eigendrehimpuls (Spin). Fermionen haben einen halbzahligem Spin, also  $1/2$ ,  $3/2$  ... Zu ihnen gehören die Atombausteine Elektron, Proton und Neutron sowie alle Atome mit einer ungeraden Zahl an Neutronen. Bosonen sind Teilchen mit ganzzahligem Spin: Photonen, Mesonen sowie Atome mit gerader Neutronenzahl. So ist Helium-4 mit zwei Neutronen ein Boson, Helium-3 mit einem Neutron ein Fermion. Bei Raumtemperatur unterscheiden sich bosonische und fermionische Gase nicht: Die Teilchen sind über alle verfügbaren Zustände gleichmäßig verteilt. Bei sehr tiefen Temperaturen ist das anders: Bosonen können sich dann in großer Zahl im gleichen Quantenzustand ansammeln und ein Kondensat bilden. Fermionen hingegen sind Einzelgänger: Nur jeweils ein Teilchen darf sich in einem bestimmten Quantenzustand aufhalten (Paulis Ausschließungsprinzip). Die verfügbaren Energiezustände füllen sich also nacheinander auf und bilden keinen makroskopisch besetzten Quantenzustand.

---

## WIE MAN LICHTTROPFEN MACHT

---

Das Bonner BEC-Experiment: Herzstück ist die winzige Lichtkammer (links). Ein Laserstrahl pumpt Photonen in die mit einem Farbstoff gefüllte Kammer. Zwei gekrümmte Spiegel – Stückpreis 2000 Dollar – schließen das Photonengas ein. Dafür sorgt die hochreflektierende Oberfläche aus dielektrischen nichtleitenden Schichten. Das Experiment wird mit Spektrometer (zur Messung der Wellenlängen) und Kamera aufgezeichnet.

---

## MEHR ZUM THEMA

---

### Internet

Verständliche Einführung in die atomare Bose-Einstein-Kondensation: [www.iap.uni-bonn.de/P2K/bec/](http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/bec/)

Arbeitsgruppe Quantenoptik in Bonn: [www.iap.uni-bonn.de/ag\\_weitz/index.html](http://www.iap.uni-bonn.de/ag_weitz/index.html)

Nobelpreis für das atomare BEC: [nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2001/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/)

