

QUANTENOPTIK

Ultrakalte Quantencocktails

Gemischte Quantengase aus Bosonen und Fermionen bieten Perspektiven für Quantensimulationen, Quanteninformationsverarbeitung und Präzisionsmessungen.

Kai Bongs und Klaus Sengstock

In den letzten Jahrzehnten ist es zunehmend gelungen, bisher unzugänglich geglaubte Quantenphänomene direkt im Experiment zu erforschen und zu kontrollieren. In dieser Hinsicht bieten gerade ultrakalte Atomgase einzigartige Möglichkeiten mit zahlreichen Verfahren zur Manipulation und Analyse auf Quantenniveau. Die Physik der jüngst in den Fokus gerückten Mischungen aus ultrakalten bosonischen und fermionischen Atomen vereint diese Entwicklungen auf beispielhafte Weise.

Die Entwicklung der Quantenphysik Anfang des letzten Jahrhunderts war einerseits geprägt von Gedankenexperimenten. Andererseits wurde sie angetrieben durch neue und unerwartete Phänomene wie die Suprafluidität und die Supraleitung, die sich im Rahmen der klassischen Physik nicht verstehen ließen. Supraleitung und Suprafluidität sind – wie wir inzwischen wissen – direkt verbunden mit kollektiven Quanteneffekten und der sog. Bose-Einstein-Kondensation. Damit sind sie eng verwandt mit der Physik ultrakalter Quantengase, in denen sich Suprafluidität, Transportphänomene, kollektive Anregungen und vieles mehr in nahezu perfekt reinen Modellsystemen direkt untersuchen und sichtbar machen lassen. Bereits 1925 schuf Albert Einstein mit der Vorhersage der Bose-Einstein-Kondensation eine wichtige Grundlage für die heutige Physik der Quantengase (Infokasten „Quantengase“) [1–4]. Satyendranath Bose hatte zuvor das Plancksche Strahlungsgesetz für Lichtquanten mithilfe der Statistik hergeleitet. Diese Theorie erweiterte Einstein, indem er die nur durch diese Statistik verursachte Ansammlung eines makroskopischen Anteils massebehafteter Teilchen in einem System im quantenmechanischen Grundzustand vorhersagte.

Da atomare Quantengase sehr „empfindlich“ gegen Störungen sind, setzt ihre Erzeugung ein Ultrahochvakuum von typischerweise 10^{-11} mbar voraus. Darüber hinaus sind Techniken notwendig, um die Ensembles mithilfe magnetischer bzw. elektromagnetischer Felder berührungsfrei und thermisch isoliert zu speichern. Die Kühlung selbst geschieht durch die Absorption und Reemission von Photonen (Laserkühlung) sowie das anschließende Abdampfen der energiereichsten Atome (Verdampfungskühlung) [2–4]. In der Regel entstehen dabei in weniger als einer Minute entartete Quantengase mit einigen 10^4 bis 10^6 Teilchen,

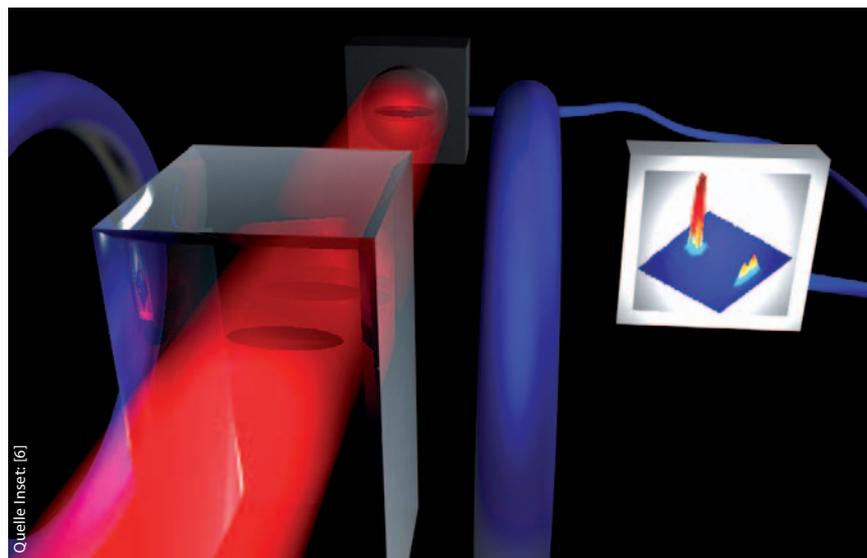


Abb. 1 Mischungen ultrakalter Quantengase lassen sich mithilfe magnetischer Felder speichern (angedeutet durch die blauen Spulen) und mittels eines resonanten Laserstrahls (rot) abbilden. Das Inset zeigt eine im Kollaps begriffene Bose-Fermi-Mischung mit den Dichteprofilen von ^{87}Rb (links) und ^{40}K (rechts) – zur besseren Übersichtlichkeit räumlich getrennt.¹⁾

einem Druck von ca. 10^{-2} mbar und Lebensdauern von einigen Sekunden bis Minuten. Da die Energie atomarer Übergänge sehr groß ist verglichen mit der thermischen Energie bei Raumtemperatur, muss die Vakuumkammer nicht gekühlt werden. Daher eignen sich Vakuum-Glaszellen, die hervorragend optisch zugänglich sind (Abb. 1). Die ultrakalten Ensembles lassen sich dann mithilfe eines nah-resonanten Laserstrahls sehr einfach und hochauflösend auf eine CCD-Kamera abbilden. Aus der Dunkelheit des Schattens, den die

¹⁾ Die Mulde im Fermi-Profil entsteht durch kollapsbedingte Verluste im Überlagerungsbereich mit dem Bose-Einstein-Kondensat.

KOMPAKT

- Ultrakalte atomare Gase öffnen ein neues experimentelles Fenster zu quantenmechanischen Phänomenen, die sich direkt und kontrolliert studieren lassen.
- Mischungen dieser Quantengase erweitern das zugängliche Spektrum physikalischer Phänomene, wobei sich mittels eines Magnetfelds die Wechselwirkung innerhalb der Mischung präzise einstellen lässt.
- Dank zusätzlicher Wechselwirkungsfreiheitsgrade erlauben Bose-Fermi-Mischungen es, technologisch relevante Effekte wie den Magnetismus oder den Einfluss von Verunreinigungen gezielt zu untersuchen.

Prof. Dr. Kai Bongs, MUARC, School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, UK und Prof. Dr. Klaus Sengstock, Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg

2) Interessanterweise ähneln sich die Entartungstemperaturen und damit auch die Kühlungsanforderungen für Bosonen und Fermionen vergleichbarer Masse.

Atomwolke wirft, ergibt sich die Dichteverteilung des Quantengases.

Die experimentellen Techniken, mit denen sich ultrakalte Atomgase erzeugen, manipulieren und untersuchen lassen, haben sich seit der erstmaligen Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten im Jahr 1995 rasant weiterentwickelt. Angesichts dieser Erfolge bei einkomponentigen Systemen ist es nun möglich, auch Mischsysteme aus unterschiedlichen atomaren Spezies (z. B. verschiedene Gase aus Alkalimetallen wie K-Rb, Li-Na, Li-Rb,...) präzise zu kontrollieren. Dies eröffnet vielfältige neue Perspektiven, um eine Fülle physikalischer Phänomene mit den verschiedensten Mischsystemen zu untersuchen (Tab. 1).

Wir diskutieren im Folgenden die Physik von Bose-Fermi-Mischungen näher, wobei wir aber immer zunächst von den einkomponentigen Quantengasen ausgehen, da sie die Grundlage für die Mischungen bilden. Entartete Bose-Fermi-Mischungen in verdünnten atomaren Gasen lassen sich im Prinzip genauso erzeugen wie ein Bose-Einstein-Kondensat, nur dass alle Schritte mit zwei atomaren Spezies gleichzeitig durchgeführt werden müssen.²⁾ Eine Besonderheit ergibt sich bei der Verdampfungskühlung für den fermionischen Anteil. Dies liegt daran, dass man für die häufig verwendete Speicherung der Atome in einer magnetischen Falle gerne spinpolarisierte Ensembles im „gestreckten“ Spinzustand (d. h. mit maximaler m -Quantenzahl) benutzt, die keine spinändernden Stöße vollführen können und somit Verluste minimie-

ren. Das Pauli-Prinzip verhindert nun, dass sich bei einem reinen fermionischen Gas aus spinpolarisierten, d. h. identischen, Fermionen die Atome so nahe kommen, dass sich ihre Wellenfunktionen signifikant überlappen. Bei den niedrigen Temperaturen, die zur Quantenentartung bei verdünnten atomaren Gasen erforderlich sind, wird dadurch die zur Thermalisierung notwendige Stoßwechselwirkung faktisch vollständig unterdrückt. Die Verdampfungskühlung funktioniert somit nur zusammen mit den Bosonen als „Kühlmittel“ (sympathetische Kühlung).

Im Hinblick auf die Beobachtung der Mischsysteme erlaubt es die Frequenzselektivität der Atome, die einzelnen Komponenten zu trennen, indem das System zweimal mit verschiedenen Laserfrequenzen beleuchtet wird.

Faszination dank Wechselwirkung

Das Bose-Einstein-Kondensat als „Prototyp“ des ultrakalten Quantengases ist so besonders, da dieser Phasenübergang ausschließlich auf der Quantenstatistik und nicht wie etwa klassische Phasenübergänge auf Wechselwirkungen beruht. Ein vollständig wechselwirkungsfreies „ideales Gas“ wie in der reinen Theorie würde aber in der Praxis zu Problemen führen, da z. B. Thermalisierungsprozesse nicht mehr stattfinden würden und sich daher ein Bose-Einstein-Kondensat nur schwer durch Kühlung erzeugen ließe. Für die

QUANTENGASE

Der Begriff **Quantengas** bzw. entartetes Gas steht allgemein für ein durch die Quantenstatistik dominiertes Gas, bei dem sonstige Wechselwirkungen oder thermische Anregungen relativ klein sind. Das Gegenstück zum entarteten Bose-Gas ist das auf der Fermi-Dirac-Statistik beruhende entartete Fermi-Gas, das große Teile der Physik (z. B. Atome, Festkörper, Neutronensterne) dominiert. Bei Atomen entscheidet der Gesamtdrehimpuls mit dem Kernspin darüber, ob das Atom ein Boson ist (ganzzahliger Gesamtdrehimpuls) oder ein Fermion (halbzahliger Gesamtdrehimpuls). Das entartete Fermi-Gas ist durch die vom Pauli-Prinzip verlangte Aufreihung der Teilchen in den Energieniveaus des Systems bis zu hohen Temperaturen und Wechselwirkungen relativ robust und in vielen Systemen beobachtbar. Demgegenüber erfordert das entartete Bose-Gas, d. h. ein Bose-Einstein-Kondensat, extreme Bedingungen und ist entsprechend empfindlich.

Der Bose-Einstein-Quanten-Phasenübergang tritt auf, wenn die sog. Phasenraumdichte $D = n\lambda(T)$ größer als $g_{3/2}(1) \approx 2,612$ wird, wobei n die Teilchendichte,

$$\lambda(T) = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T}}$$

die thermische de Broglie-Wellenlänge und

$$g_a(x) = \sum_{i=1}^{\infty} x^i / i^a$$

die Bose-Funktion sind. Anschaulich findet der Übergang bei einer Kombination von Dichte und Temperatur statt, bei der die Wellenlänge der Teilchen gerade in die Größenordnung ihres mittleren Abstands kommt, sich die Wellenpakete also anfangen zu überlappen. Stimulierte Streuung der Teilchen in den Grundzustand des Systems führt dann zur Besetzung der Kondensat-Wellenfunktion als makroskopische Materiewelle.

Diese Bedingung für die **Bose-Einstein-Kondensation** ist in realen atomaren Gasen eigentlich thermodynamisch verboten und nur mit einem Trick zu erreichen. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen würden normalerweise dominieren und schon vorher zu einem klassischen Kondensationsprozess führen. Der Trick besteht darin, das Gas so stark zu verdünnen, dass einerseits zwar noch viele Zwei-Teilchen-Stöße stattfinden, welche Temperaturunterschiede ausgleichen (Thermalisierung), dass aber an-

dererseits Drei-Teilchen-Stöße, die zur Energie- und Impulserhaltung bei der Bildung von Kondensationskeimen notwendig sind, nur noch selten auftreten. In diesem Sinne ist das Gas zwar thermalisiert, aber in einem metastabilen thermodynamischen Zustand, ähnlich einer unterkühlten Flüssigkeit. Um etwa mit gängigen Alkaliatomen Kondensate mit Lebensdauern im Bereich von Sekunden zu erreichen, darf die Dichte 10^{15} cm^{-3} (also rund 10 000-mal dünner als Luft unter Standardbedingungen) nicht überschreiten. Dies erfordert aufgrund der obigen Beziehung für $n\lambda$ extrem niedrige Temperaturen im Bereich von Nanokelvin.

Gerade diese ultrakalten Temperaturen machen die Faszination **atomarer Quantengase** aus. Durch die niedrige Temperatur wächst die Materiewellenlänge auf bis zu hunderten von Mikrometern. Gleichzeitig verlangsamt sich die Systemdynamik stark und läuft typischerweise im Bereich von Millisekunden ab. Quantenphänomene lassen sich somit wie unter einem Zeitlupen-Mikroskop präzise beobachten und gleichzeitig in-situ mithilfe atomoptischer Methoden manipulieren.

Ultrakalte Quantengasmischungen		
Mischung	Zusammensetzung	Aktuelle Forschungsthemen
Boson-Boson	Zwei verschiedene bosonische Spezies	Bosonische Moleküle, Molekül-Atom-Kopplung
Spin-Spin	Eine bosonische Spezies in einer Mischung verschiedener Spin-zustände	Magnetismus, Kohärenz, Topologische Phasen
Fermion-Fermion	Zwei verschiedene fermionische Spezies	Superfluidität, BEC/BCS-Übergang
Boson-Fermion	Mischung einer bosonischen mit einer fermionischen Spezies	Fermionische Moleküle, Mischungsphasen, Verunreinigungseffekte

Tab. 1 Beispiele einiger aktueller Forschungsthemen mit Gemischen ultrakalter atomarer Gase.

Physik der Quantengase ist es daher wesentlich, Wechselwirkungen zuzulassen, ihre Energieskala aber klein gegenüber derjenigen des interessierenden Phänomens zu halten. Bei der Bose-Einstein-Kondensation mit verdünnten Atomgasen gelang dies zunächst bei einer so niedrigen Dichte, dass die Kondensation als solche thermodynamisch nahezu ideal realisierbar war. Im kondensierten System dominiert dann allerdings die natürliche interatomare Stoßwechselwirkung die Kondensat-Wellenfunktion. Dies macht jedoch den physikalischen Reichtum dieser Systeme aus. So ermöglicht es die Wechselwirkung, Kohärenz über das System auszubilden und auch Materiewellen-Solitonen oder nichtlineare Effekte wie die Vier-Wellen-Mischung anzuregen. Die Wechselwirkung macht das Bose-Einstein-Kondensat zu einem faszinierenden Vielteilchensystem, in dem sich fundamentale physikalische Modelle detailliert studieren lassen. Beispiele sind fermionische Eigenschaften, die in einem eindimensionalen Gas bosonischer Atome auftreten (Tonks-Girardeau-Gas), oder die wechselwirkungsinduzierte Unterdrückung der Superfluidität eines Bose-Einstein-Kondensats in einem Gitterpotential (Mottscher Superfluid-Isolator-Übergang).

Reine Bose-Einstein-Kondensate als einkomponentige Quantengase haben damit ein neuartiges Fenster zur Welt der Quantenphänomene eröffnet, welches viele Lehrbuchbeispiele der Quantenmechanik direkt sichtbar macht. Aufbauend auf dem Verständnis dieser relativ einfachen Systeme rücken derzeit Mischsysteme ins Zentrum der internationalen Forschung. In diesen mehrkomponentigen Systemen führen die zusätzlichen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten dazu, dass sich das zugängliche Spektrum an physikalischen Phänomenen signifikant vergrößert. Dies ermöglicht es insbesondere, technologisch relevante Phänomene wie den Magnetismus oder den Einfluss von „Verunreinigungen“ zu studieren.

Wie groß der Einfluss bereits eines einzigen weiteren Freiheitsgrades der Wechselwirkung ist, machen insbesondere ultrakalte Bose-Fermi-Mischungen deutlich, in denen wie bisher eine Wechselwirkung der Bosonen untereinander und zusätzlich eine Wechselwirkung zwischen Bosonen und Fermionen auftritt: Die ultrakalten Fermionen, die wie oben erwähnt aufgrund des Pauli-Prinzips nicht miteinander wechselwirken,

wirken wie eine gezielt dosierbare Dotierung, die Misch- und Verunreinigungseffekte zugänglich macht. Die eher makroskopischen Effekte der zusätzlichen Wechselwirkung zeigen sich vor allem bei Mischphänomenen. So weist eine Mischung aus Bosonen und Fermionen in einem harmonischen Fallenpotential und für eine feste, repulsive Bose-Bose-Wechselwirkung abhängig von der Bose-Fermi-Wechselwirkung verschiedene Phasen auf (Abb. 2): Bei einer starken repulsiven Wechselwirkung verhalten sich beiden Spezies ähnlich wie Öl und Wasser, die sich nur unter Energieaufwand vermischen lassen, und bilden im Grundzustand zwei getrennte Phasen. Im Bereich moderat repulsiver bis hin zu leicht attraktiver Wechselwirkung durchmischen sich beide Spezies und überlappen dann vollständig. Die kinetische Energie und die repulsive Bose-Bose-Wechselwirkung dominieren, sodass das Energieminimum bei möglichst großem Volumen und damit bei einem Überlapp beider Spezies liegt. Eine schwache repulsive Wechselwirkung reicht dann nicht zur Trennung der Bosonen und Fermionen, da es zu viel Energie kosten würde, die Ausdehnung der einzelnen Spezies einzuschränken. Gleichzeitig genügt eine schwache attraktive Wechselwirkung nicht, um die Bose-Bose-Abstoßung und die kinetische Energie zu überwinden und die Mischung insgesamt zu komprimieren. Wenn aber die attraktive Bose-Fermi-Wechselwirkung immer stärker wird und einen kritischen Wert übersteigt, kommt es zur Katastrophe: Die Bose-Fermi-Wechselwirkungsenergie dominiert die Energie des Systems, sodass diese sich mit wachsender Dichte, also steigender Wechselwirkung, immer weiter absenken lässt. Schließlich kollabiert das System [5, 6]. Dieser dramatische Effekt führt auf kurzen Zeitskalen zu einem Dichteregime, in dem Drei-Körper-Stöße für die Entstehung von Molekülen und für massive Verluste verantwortlich sind. Dies alles geschieht meist viel schneller als die typische Fallendynamik, sodass nicht alle Atome in den vernichtenden Bereich des kollabierenden Anteils fallen und starke Anregungen bzw. teilweise wiederholte Kollapsphänomene auftreten [6].

Die Experimente mit Bose-Fermi-Mischungen profitieren besonders davon, dass sich die Systemparameter in ultrakalten Gasen meist einstellen lassen.



Abb. 2 Bei der Mischung zweier Substanzen (zwei Flüssigkeiten obere Reihe, zwei Quantengase untere Reihe) tritt bei stark repulsiver Wechselwirkung zwischen den Stoffen eine Phasentrennung auf (links). Ohne starke Wechselwirkung können Substanzen typischerweise

mischen (Mitte). Eine stark attraktive Wechselwirkung führt dazu, dass sich die Substanzen so stark anziehen, dass die Mischung durch die gleichzeitig ansteigende Dichte schließlich in sich „kollabiert“ (rechts).

Dadurch ist es ohne die aufwändige Präparation neuer Proben möglich, alle obigen Regimes mit einer einzigen Bose-Fermi-Mischung zu erzielen. Dies wurde z. B. mit einer Mischung aus bosonischen Rubidium-Atomen (^{87}Rb) und fermionischen Kalium-Atomen (^{40}K) realisiert [7, 8]. Die Bose-Fermi-Wechselwirkung lässt sich dabei aufgrund einer sog. Feshbach-Resonanz durch Anlegen eines Magnetfeldes sowohl repulsiv als auch attraktiv einstellen (Infokasten „Feshbach-Resonanz“). Diese Möglichkeit, die Wechselwirkung präzise einzustellen, erlaubt es, ganze Phasendiagramme zu vermessen und direkt die verschiedenen Parameterbereiche zu vergleichen. Dabei lassen sich durch die Wahl der jeweiligen Potentialgeometrie ganz unterschiedliche physikalische Phänomene untersuchen (z. B. eine harmonische Falle wie oben für Mischphänomene oder alternativ ein optisches Gitter für Festkörperphänomene). Zusätzlich zu dieser Vielseitigkeit in der Modellierung verschiedener Systeme ergibt sich mit einer heteronuklearen Feshbach-Resonanz auch die weiter unten beschriebene Möglichkeit, ultrakalte heteronukleare Moleküle zu erzeugen und somit in ganz neue Bereiche wie die ultrakalte Chemie vorzustoßen.

Gitterordnung mit Unordnung

Optische Gitter, also aus interferierenden Lichtfeldern gebildete „Kristalle“ aus Licht, haben sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Werkzeug in der Physik der Quantengase entwickelt. Die durch die Lichtfeldmaxima und -minima erzeugten periodischen Potentialstrukturen übernehmen dabei gewissermaßen die Rolle des Festkörperkristalls, in dem die ultrakalten Atome analog zu den Festkörperelektronen zu sehen sind. Die ultrakalten Atome mit ihrer großen de Broglie-Wellenlänge erlauben hierbei weiterhin kohärente Effekte trotz der gegenüber einem Festkörper tausendfach größeren Gitterperiode. Dieses gigantische kohärente Kristallmodell lässt sich zudem über die Intensität der Gitter-Laserstrahlen extrem schnell und präzise in seinen Parametern ändern, sodass ein ganz neuer Zugang

zur entsprechenden Physik entsteht. Neue Einblicke auf die Vorgänge im Kristall ergeben sich durch die Möglichkeit, das Gitter abzuschalten. Im Gitter werden die Materiewellen typischerweise durch Bloch-Funktionen beschrieben, d. h. nach dem Ansatz $\psi(\vec{r}) = u_{\vec{q},n}(\vec{r})e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}}$, wobei $u_{\vec{q},n}(\vec{r} + \vec{a}) = u_{\vec{q},n}(\vec{r})$ eine mit dem Gittervektor \vec{a} periodische Funktion, n der Bandindex und \vec{q} der Quasiimpuls im Gitter sind. Diese Bloch-Funktionen werden bei schnellem Abschalten des Gitters, also durch einfaches Ausschalten der Gitterlaser, auf die Impulsbasis des freien Raums (ebene Wellen $\propto e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}$ mit Wellenvektor \vec{k}) projiziert. Bei einer vorher kohärenten Besetzung, z. B. mit einem suprafluiden Bose-Einstein-Kondensat, entsteht dann ein Interferenzmuster im Impulsraum (für den Fall langsamen Abschaltens siehe [9]). Das Gitterpotential moduliert dabei die kohärente Materiewelle, sodass diese nach der Expansion ganz ähnlich wie an einem Festkörperkristall gebeugte Elektronen oder Neutronen interferiert.

Bose-Einstein-Kondensate in optischen Gittern erlauben es, Phänomene wie Bloch-Oszillationen oder den Übergang vom Superfluid zum Mott-Isolator direkt zu beobachten. Da die einkomponentigen Bose-Einstein-Kondensate rein sind und Störungen im optischen Gitter fehlen, ergibt sich eine weitgehend ideale Umgebung – eine Art „ideales“ Modell für die fundamentalen theoretischen Effekte.

Beim Vergleich mit realen Festkörpersystemen stellt sich die entscheidende Frage, wie robust diese idealisierten Effekte gegenüber dem Einfluss von Störungen (z. B. Unreinheiten) sind und für welche Phänomene Störungen sogar essenziell sind. An dieser Stelle kommen die mehrkomponentigen Quantengase ins Spiel. Anhand des Transports einer Bose-Fermi-Mischung in einem eindimensionalen optischen Gitter erforschte eine Gruppe am LENS in Florenz ein Beispiel für solche essenziellen Einflüsse von Unreinheiten [10]. Ausgangspunkt war dabei ein reines fermionisches Quantengas in einer harmonischen Falle, der in einer Richtung ein periodisches Gitterpotential überlagert war. Bei Auslenkung dieses stoßfreien, d. h. nicht wechselwirkenden Quantengases aus der Ruhelage führte dieses keine Schwingungen um das Potential-

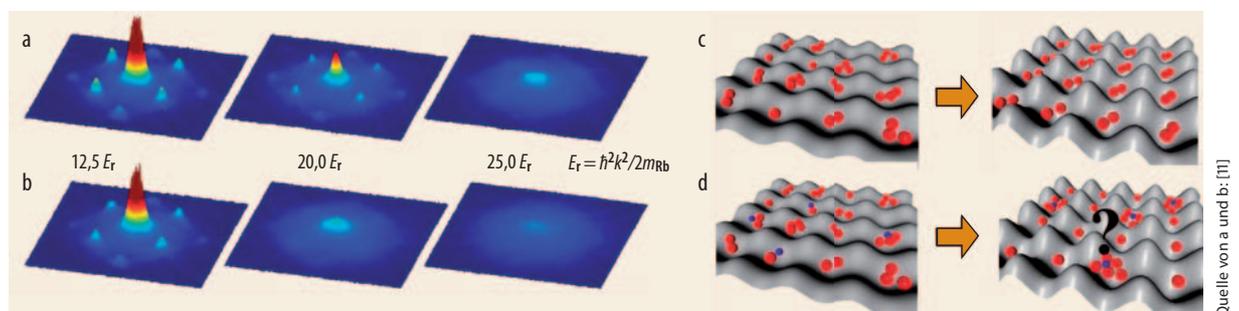


Abb. 3 Interferenzsignal eines ultrakalten Ensembles von ^{87}Rb -Atomen abhängig von der Tiefe des optischen Gitters ohne (a) und mit (b) fermionischen „Verunreinigungen“. Der Verlust an Interferenzkontrast im reinen System entspricht dem Superfluid-Mott-Isolator-

Übergang, den (c) für ein System mit zweifacher Besetzung zeigt: Im flachen Gitter (links) ist die kohärente Materiewellenfunktion über das ganze Gitter „verschmiert“. Die Projektion der Atome auf die einzelnen Gittertöpfe entspricht der von einem kohärenten Zustand er-

warteten Verteilung. Im tiefen Gitter rechts sind die Atome mit jeweils „scharfer“ Teilchenzahl in den einzelnen Gittertöpfen lokalisiert und verlieren ihre Kohärenz. Im „verunreinigten“ System (unten) tritt der Kohärenzverlust früher auf.

Quelle: von a und b: [11]

minimum aus, sondern blieb stattdessen lokalisiert an der Stelle, zu der es ausgelenkt wurde, und vollführte weitgehend ungedämpfte Bloch-Oszillationen im Impulsraum.

Die Bloch-Oszillationen lassen sich im Materiewellenbild wie folgt verstehen: Nach de Broglies Definition der Materiewellenlänge als $\lambda = h/p$ mit dem Impuls p und der Planckschen Konstante h nimmt die Materiewellenlänge bei Erhöhung des Impulses durch die auf das Ensemble wirkende Beschleunigung ab. Sobald die Materiewellenlänge nun auf das Doppelte des Reihenabstands a im Gitter abgesunken ist, erfüllt sie die Bragg-Bedingung für Reflexion, d. h. die an den einzelnen Gittertöpfen reflektierten Anteile der Materiewelle addieren sich phasenrichtig auf, sodass es zu einer 100-prozentigen Reflexion kommt. Das Vorzeichen des Materiewellenimpulses kehrt sich somit um, und die Beschleunigungsphase beginnt von Neuem, bis wieder die Bragg-Bedingung erfüllt ist usw. Transport findet bei einem solchen perfekt wechselwirkungsfreien Gas im Gitter also nicht statt, sondern nur eine Oszillation. Leitung beruht darauf, dass z. B. Unreinheiten wie Bosonen im Fermion-System die Kohärenz der Bloch-Oszillationen stören. Die Leitfähigkeit nimmt dann bei zunehmender Bosonen-Konzentration zunächst zu, erreicht dann ein Maximum und nimmt bei weiter steigender Konzentration schließlich wieder ab. Bereits in diesem relativ einfachen System sind die Ähnlichkeiten zur störstellenabhängigen Leitung in einem Festkörper frappierend, wobei der störungsfreie Grenzfall in einem Festkörper kaum realisierbar ist.

Etwas komplexer sind die Phänomene in einem dreidimensionalen optischen Gitter, in dem sowohl

unsere Gruppe in Hamburg als auch Forscher der ETH Zürich den Einfluss fermionischer „Verunreinigungen“ auf die Kohärenz eines bosonischen Ensembles untersucht haben (Abb. 3) [11, 12]. Neben der Fermionen-Konzentration diente in diesen Experimenten die Stärke des Gitterpotentials als wesentlicher Parameter. Wird das Gitterpotential erhöht, so verringert sich die Tunnelkopplung, und die lokale Wechselwirkung wächst. Dadurch bricht bereits bei einem reinen Boson-System – sobald ein kritischer Wert des Potentials überschritten ist – die Kohärenz aufgrund des Phasenübergangs vom Superfluid zum Mott-Isolator zusammen. Dieser kritische Wert diente als empfindlicher Indikator für die Auswirkung der fermionischen Verunreinigungen. In den Experimenten zeigte sich eine deutliche Verstärkung dieses Effekts, sodass die Kohärenz schon bei bis zu 25 Prozent geringerem Gitterpotential als beim reinen Boson-System auftrat. Als Ursache für diesen überraschend großen Effekt wird derzeit ein ganzes Spektrum an Phänomenen diskutiert: von der Bildung von Teilchenkonglomeraten über die Lokalisierung durch Unordnung bis hin zu adiabatischen Temperaturänderungen. Dies zeigt deutlich eine der spannenden und komplexen Richtungen, in die sich die Physik der Quantengase derzeit entwickelt.

„Saubere“ Chemie

Eine ganz andere Entwicklung bahnt sich derzeit in der ultrakalten Chemie mit Quantengasen an [13]. Im Gegensatz zu einer üblichen thermodynamischen chemischen Reaktion lassen sich ultrakalte Atome

FESHBACH-RESONANZ

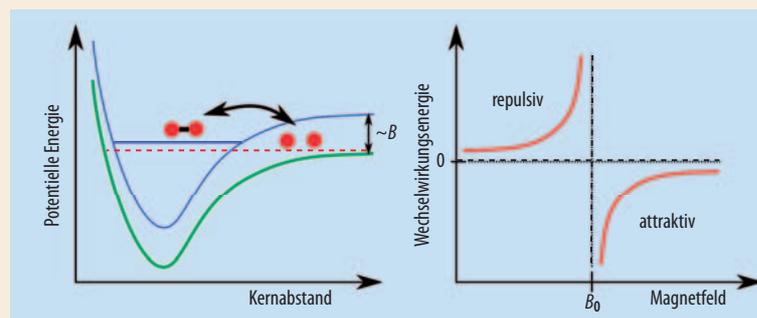
Die Wechselwirkung zwischen den ultrakalten Atomen entsteht durch Stöße, wobei jeweils Einzelereignisse von Stößen zweier Atome betrachtet werden. Im Schwerpunktsystem beider Atome bestimmt das gemeinsame Molekülpotential die Relativbewegung (Born-Oppenheimer-Näherung, Abb. links). Aufgrund der kleinen kinetischen Energieskala der Atome im Vergleich zum Molekülpotential läuft ein stoßendes Atompaar praktisch auf der Dissoziationsenergie (gestrichelte Linie) aufeinander zu, bis der abstoßende Anteil des Molekülpotentials es bei kleinen Abständen reflektiert. Das Atompaar „erfährt“ also fast den ganzen Potentialverlauf, der letztendlich zu einer mittleren Wechselwirkungsenergie für das ultrakalte Ensemble führt („mean field Näherung“). Die Möglichkeit einer magnetischen Änderung dieser Wechselwirkung ergibt sich, falls in der Nähe der Dissoziationsenergie ein gebundener Zustand eines weiteren Molekülpotentials mit einem anderen magnetischen Moment vorliegt. Anschaulich gesprochen kann

das stoßende Atompaar nun eine Weile im gebundenen anderen Molekülzustand verbringen. Dabei ändert sich die Wechselwirkungsenergie je nach relativer Lage des gebundenen Zustands, und es kommt zu einer **Feshbach-Resonanz** mit einem Sprung von „unendlich abstoßender“ zu „unendlich anziehender“ Wechselwirkung, wenn der gebundene Zustand die Dissoziationsenergie kreuzt (Abb. rechts).

Das unterschiedliche magnetische Moment erlaubt es dabei, die Molekülpotentiale mithilfe eines extern angelegten Magnetfeldes B relativ zueinan-

der zu verschieben. Die interatomare Wechselwirkung lässt sich somit präzise steuern und sogar während eines Experiments ändern.

Zudem wird es durch eine Variation des Magnetfeldes über die Feshbach-Resonanz hinweg möglich, ein Atompaar „adiabatisch“ in ein gebundenes Molekül zu überführen und in umgekehrter Variationsrichtung des Magnetfeldes auch wieder zurück. Dies erlaubt einen kontinuierlichen Wechsel eines Systems wechselwirkender Atome in ein System von Molekülen.



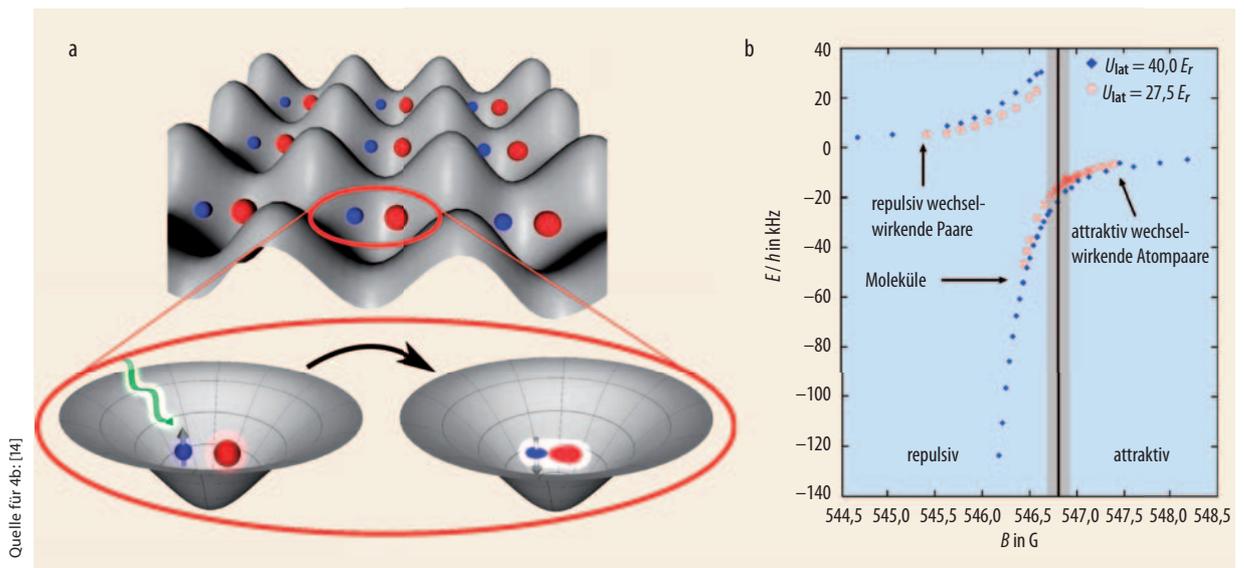
ganz gezielt in Moleküle – von einem wohl definierten Quantenzustand in einen anderen – überführen. Diese „kohärente“ chemische Reaktion ist umkehrbar, sodass es möglich ist, die Moleküle auch wieder in Atome aufzuteilen. Hierbei können sogar Oszillationen zwischen Atomen und Molekülen auftreten. Magnetfelder in der Nähe einer Feshbach-Resonanz erlauben es, diese Experimente zu realisieren sowie die Wechselwirkung zu verstimmen. Dafür nutzt man aus, dass bei der Feshbach-Resonanz die Energie des Quantenzustands des freien Atompaars die Energie des Quantenzustands eines gebundenen Moleküls kreuzt, wenn das Magnetfeld verändert wird. Nun lässt sich z. B. durch langsames kontinuierliches Verändern des Magnetfeldes über die Resonanz hinweg ein Atompaar in ein Molekül überführen und umgekehrt (adiabatische Passage). Weitere Methoden bestehen darin, ein atomares Ensemble auf der „molekularen Seite“ der Feshbach-Resonanz zu thermalisieren oder die Atom- und Molekülzustände mit oszillierenden Magnetfeldern zu koppeln. Die kontrollierte Molekülbildung mit ultrakalten atomaren Gasen hat sich in den letzten Jahren zu einem neuen und sehr aktiven Schwerpunkt bei der Erforschung der Quantengase entwickelt. Ein Beispiel ist die mit dem Verständnis der Supraleitung verknüpfte Untersuchung des sog. BEC-BCS-Übergangs zwischen einem Bose-Einstein-Kondensat von Molekülen zu einem superfluiden fermionischen Zustand, da zwei fermionische Atome ein bosonisches Molekül ergeben.

Kürzlich ist es erstmals gelungen, ultrakalte heteronukleare Moleküle aus einer Bose-Fermi-Mischung zu erzeugen. Eine der Herausforderungen bei diesem weiteren Meilenstein in der ultrakalten Chemie lag in der „empfindlichen Natur“ der Feshbach-Moleküle,

die entsprechend ihres Erzeugungsverfahrens in einem hochangeregten internen Vibrationszustand vorliegen. Ein Stoß mit anderen Teilchen kann leicht die hohe interne Energie freisetzen und führt so unweigerlich zum Verlust des Moleküls. Während Systeme von Molekülen aus fermionischen Atomen durch das Pauli-Prinzip weitgehend vor solchen vernichtenden Ereignissen geschützt sind, können rein bosonische Systeme oder Bose-Fermi-Mischsysteme sehr kurze Lebensdauern aufweisen. Der entscheidende Trick liegt nun darin, die „schlechten“ Stöße zu vermeiden, was wir beispielsweise in unseren Experimenten in Hamburg erreicht haben, indem wir die Moleküle in getrennten Töpfen eines tiefen optischen Gitters (als Ansammlung von „chemischen Miniaturreaktoren“, Abb. 4) erzeugt haben [14].

Die heteronuklearen Moleküle weisen im Grundzustand starke dipolare Wechselwirkungen auf, da die unterschiedlichen Elektronenaffinitäten ihrer Konstituenten für eine Verschiebung der die Kerne umgebenden Elektronenwolke sorgen. Daher sind künftig dipolare Quantengase mit ganz neuen Quantenphasen denkbar. Diese Systeme haben aber auch das Potenzial für spannende Anwendungen wie einen Quantencomputer mit dipolarer Kopplung der Qubits oder Präzisionsmessungen zur Existenz eines permanenten Dipolmoments des Elektrons und damit zum Test heutiger fundamentaler Theorien.

Insgesamt stehen die Physik der Quantengase sowie der ultrakalten Bose-Fermi-Mischungen derzeit an einem spannenden Wendepunkt zu immer realistischeren Quantenmodellen und sowohl fundamentalen als auch technologisch relevanten Anwendungen. In Zukunft sind von diesem schnell wachsenden Gebiet sicher viele derzeit noch nicht überschaubare Im-



Quelle für 4b: [14]

Abb. 4 Mithilfe einer Feshbach-Resonanz lassen sich kontrolliert Moleküle bilden. Ein mit Atompaaren gefülltes tiefes optisches Gitter gleicht dabei einem Array von „chemischen Miniaturreaktoren“ (a). Hier kommt es mittels eines radiofrequenzinduzierten Spinflips

zu einer Atom-Molekül-Kopplung (unten) in den gebundenen Zustand. Die dafür notwendige Frequenz erlaubt es, die Bindungsenergie präzise zu vermessen (b, für zwei Werte der Gittertiefe U_{lat}). Die schwarze Linie bei 546,8 G gibt die Position der Feshbach-Resonanz an. Un-

terhalb der Feshbach-Resonanz lassen sich auf diese Weise sowohl repulsiv wechselwirkende Atompaare als auch gebundene Atompaare, d. h. Moleküle, erzeugen, deren Bindung mit Entfernung von der Resonanz stärker wird.

pulse und Erkenntnisse zu erwarten, die unser Wissen und unsere Kontrolle über die Quantenwelt entscheidend beeinflussen werden.

*

Wir danken allen ehemaligen und aktuellen Mitgliedern der Hamburger Forschungsgruppe für ihr begeistertes Engagement und die intensiven Diskussionen bei der Erforschung der faszinierenden Physik der Quantengasmischungen. Die vorgestellten eigenen Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

- [1] W. Ketterle, *Physikalische Blätter*, Juli 1997, S. 677
- [2] W. Ketterle und M. O. Mewes, *Physikalische Blätter*, Juni 1996, S. 573
- [3] K. Sengstock, W. Ertmer und M. Lewenstein, *Physikalische Blätter*, März 2001, S. 33
- [4] A. Görlitz und T. Pfau, *Physikalische Blätter*, Dezember 2001, S. 22
- [5] G. Modugno et al., *Science* **297**, 2240 (2002)
- [6] C. Ospelkaus, S. Ospelkaus, K. Sengstock und K. Bongs, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 020401 (2006)
- [7] S. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 120403 (2006)
- [8] M. Zaccanti et al., *Phys. Rev. A* **74**, 041605 (2006)
- [9] K. Bongs und K. Sengstock, *Physik Journal*, Mai 2005, S. 18
- [10] H. Ott et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 160601 (2004)
- [11] S. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 180403 (2006)
- [12] K. Günter et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 180402 (2006)
- [13] J. Hecker Denschlag, H.-Ch. Nägerl und R. Grimm, *Physik Journal*, März 2004, S. 33
- [14] C. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 120402 (2006)

DIE AUTOREN

Kai Bongs (FV Quantenoptik) studierte Physik in Hannover. Dort promovierte er 1999 über atomoptische Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten. Nach anschließenden Studien zu dunklen Solitonen in Materiewellen ging er mit einem Emmy-Noether-Forschungsstipendium für zwei Jahre an die Yale University (USA), wo er sich der angewandten Atominterferometrie widmete. 2002 wechselte Kai Bongs an das Institut für Laser-Physik der Uni Hamburg, an dem er seine Habilitation über die Physik von Quantengasmischungen abschloss. Seit September 2007 ist er Professor am Midlands Centre for Ultracold Atoms in Birmingham.



Klaus Sengstock (FV Quantenoptik) ging nach Studium und Promotion in Bonn 1994 als Postdoc nach Orsay. Er habilitierte sich 1998 in Hannover und ist seit 2001 Professor für Physik an der Uni Hamburg. Seine Forschungsarbeiten, die mit mehreren Preisen ausgezeichnet wurden, widmen sich seit vielen Jahren der Physik lasergekühlter Atome und Moleküle sowie der Entwicklung von Lasersystemen und der hochgenauen Spektroskopie. Als Hochschullehrer liegt ihm die Lehre besonders am Herzen, er ist Studiendekan und Sprecher des Graduiertenkollegs 1355. Aktuell freut er sich auf den Aufbau eines internationalen „Zentrums für Optische Quantentechnologien“, das in den nächsten Jahren an der Uni Hamburg errichtet werden soll.

