

# Teilchen auf Partnersuche

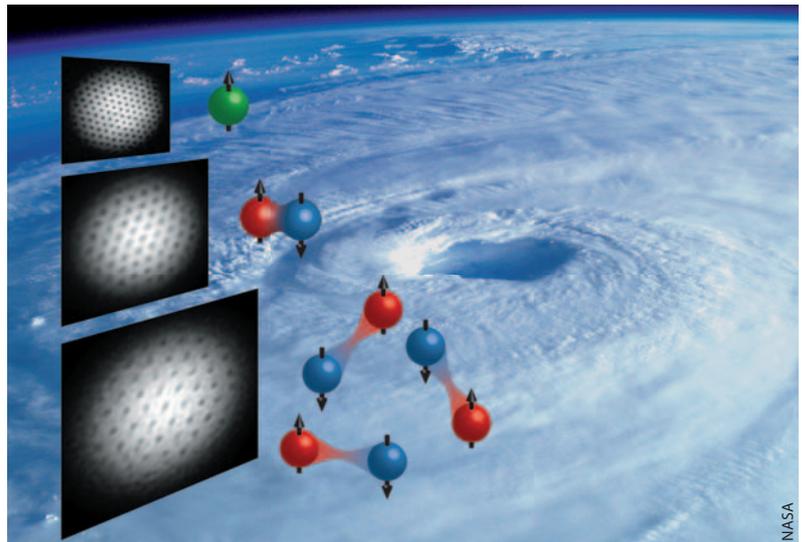
Neue Materiezustände in ultrakalten atomaren Gasen erlauben es, die Wechselwirkung zwischen den Atomen individuell einzustellen.

Martin Zwierlein

Faszinierende Phänomene wie die Suprafluidität von Helium, die Supraleitung von Metallen oder auch Magnetismus lassen sich oft durch einfache Modelle wechselwirkender Teilchen beschreiben. Ultrakalte Quantengase realisieren viele dieser Modelle in Reinstform. Stark wechselwirkende Gase aus fermionischen Atomen liefern hierbei ein Paradebeispiel für eine Suprafluidität aus Fermionenpaaren. Darüber hinaus gibt ein völlig neuartiges System, ein Fermi-Gas im Ungleichgewicht, Aufschluss über die der Suprafluidität zugrundeliegenden Mechanismen.

Es ist eine Laune der Geschichte: Die erste Suprafluidität, Helium, diente als Kühlmittel bei der Entdeckung des ersten Supraleiters. Dem holländischen Physiker Heike Kamerlingh-Onnes gelang es vor 100 Jahren, Helium bei 4,2 K zu verflüssigen. In diesen Experimenten unterschritt er auch die kritische Temperatur von 2,2 K, bei der Helium-4 ( $^4\text{He}$ ) jegliche Reibung verliert und supraflüssig wird. Diese und weitere Besonderheiten blieben zunächst unbemerkt; allerdings notierte Onnes die Dichteanomalie bei 2,2 K [1]. Bald darauf verwendete er Helium zur Abkühlung von Metallen und entdeckte dabei 1911 die Supraleitung in Quecksilber, das plötzliche Verschwinden des Widerstands bei 4,2 K. Wie wir heute wissen, entdeckte er damit die Suprafluidität in einem Elektronengas. Dass beide Phänomene, die Suprafluidität von  $^4\text{He}$  und die Supraleitung in bestimmten Metallen, bei ganz ähnlichen Temperaturen eintreten, ist glatter Zufall und verschleiert die Tatsache, dass wesentliche Unterschiede zwischen diesen Systemen bestehen.

Beide Phänomene zu erklären, dauerte gut 50 Jahre. Ganz wesentlich war die Erkenntnis, dass gleichartige Teilchen (z. B. zwei Elektronen) prinzipiell ununterscheidbar sind. Die darauf aufbauende Quantenstatistik hängt fundamental vom Teilchenspin ab. Teilchen mit ganzzahligem Gesamtspin (Bosonen) genügen der Bose-Einstein-Statistik, Fermionen tragen ungeradzahligem Spin und verteilen sich gemäß der Fermi-Dirac-Statistik. Bei hohen Temperaturen kommt die Ununterscheidbarkeit der Teilchen noch nicht zum Tragen, sie lassen sich getrennt beobachten. Nach Heisenberg sind Teilchen aber mit einer Impulsverteilung  $\Delta p$  über eine Ortsunschärfe  $\Delta x \approx \hbar/\Delta p$  „verschmiert“. Bei der Entartungstemperatur, unterhalb derer die Quanteneigenschaften des Gases zutage treten, wächst die



Statt eines einzigen Auges wie im Hurrikan bilden sich im rotierenden Quantengas viele regelmäßige Quantenwirbel, die als Nachweis für Suprafluidität dienen. Gezeigt sind Wirbelgitter in Bose-

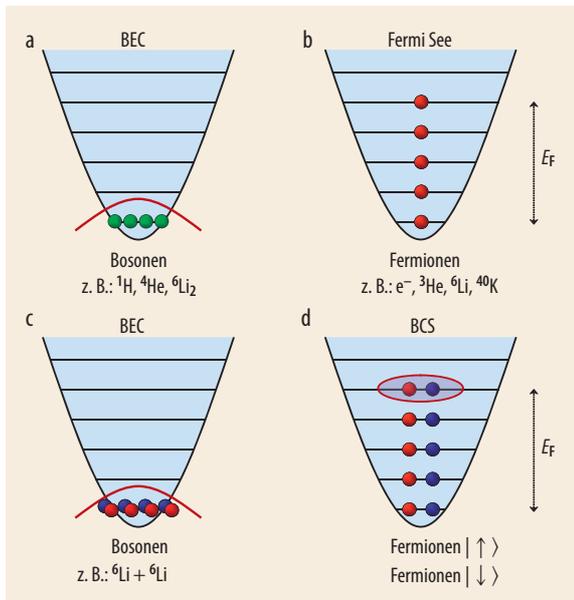
Einstein-Kondensaten (grünes Atom), in Molekül-Kondensaten (rot und blau) und in Fermionen-Paarkondensaten (große Paare).

Unschärfe auf die Größe des Abstands zwischen den Teilchen an,  $\Delta x \approx n^{-1/3}$  ( $n$  ist die Teilchendichte), und es wird „eng“. Bosonen lösen dieses Problem elegant, indem sie sich aufgrund ihrer Quantenstatistik vermehrt in der Grundzustandswellenfunktion des Systems sammeln und ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) bilden (Abb. 1). Fermionen können nicht denselben Quantenzustand einnehmen und müssen sich nach dem Pauli-Prinzip auf verschiedene Zustände verteilen; sie bilden mit abnehmender Temperatur ein entartetes Fermi-Gas. Am absoluten Nullpunkt besetzen sie die untersten Quantenzustände des Systems. Die Energie des höchsten besetzten Zustands ist die Fermi-Energie  $E_F$  (Abb. 1).

## KOMPAKT

- Ultrakalte atomare Fermi-Gase bilden eine neue Form von Suprafluidität mit einstellbarer Wechselwirkung. Suprafluidität ist nachgewiesen durch die Beobachtung von „Vortexgittern“.
- In diesen Gasen ließ sich erstmalig der Übergang von einem Bose-Einstein-Kondensat aus kleinen Molekülen zu einer BCS-Suprafluidität aus Paaren mit langreichweitiger Wechselwirkung untersuchen.
- Atomare Fermi-Gase realisieren Vielteilchenmodelle in Reinstform und lassen sich mit der Präzision atomphysikalischer Methoden analysieren.

Prof. Dr. Martin Zwierlein, Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA



**Abb. 1** Eingespart in einer harmonischen Falle bilden Bosonen in nichtwechselwirkenden Quantengasen am absoluten Nullpunkt ein Bose-Einstein-Kondensat (a), Fermionen einen entarteten Fermi-See (b). Bosonen lassen sich als stark gebundene Fermionenpaare auffassen (c). Bei schwacher Anziehung bilden Fermionen an der Oberfläche des Fermi-Sees Cooper-Paare (d).

<sup>4</sup>He ist ein Boson, dessen Entartungstemperatur bei einigen Kelvin liegt – nahe der Sprungtemperatur für Supraflüssigkeit. <sup>3</sup>He, ein Fermion, zeigt bei diesen Temperaturen keinen Phasenübergang. Die Annahme liegt nahe, dass die Supraflüssigkeit von <sup>4</sup>He direkt mit seiner Bose-Einstein-Kondensation, der Bildung einer makroskopischen Materiewelle, verknüpft ist. Tatsächlich sind Bose-Einstein-Kondensate aus wechselwirkenden Atomen supraflüssig, die Atome fließen gemeinsam als kohärente Welle, statt sich einzeln in zufällige Richtungen zu bewegen.

Wie aber können Fermionen (z. B. Elektronen in einem Metall) eine Supraflüssigkeit bilden? Sie dürfen sicher nicht in denselben Quantenzustand kondensieren. Die Lösung liegt aber auf der Hand: Falls Fermionen einander anziehen, könnten sie Paare bilden, sich also zu Bosonen zusammenschließen und in einem Paarkondensat aufgehen.<sup>1)</sup> Für diese einfache Erklärung fermionischer Suprafluidität ist allerdings eine recht starke Anziehung zwischen den Fermionen erforderlich. Das attraktive Potential muss die kinetische Energie der Nullpunktbewegung aufwiegen. Für schwächere Anziehung zwischen zwei Fermionen im freien Raum gibt es keinen gebundenen Zustand. Cooper hatte 1956 die geniale Idee, dass die Anwesenheit des Fermi-Sees zwei Fermionen an seiner Oberfläche aneinander bindet – so schwach die Wechselwirkung auch sein mag. Der voll besetzte Fermi-See schränkt aufgrund des Pauli-Prinzips die Bewegungsfreiheit der zwei Fermionen so weit ein, dass sie eine schwache Bindung eingehen. Auf diese Idee aufbauend formulierten Bardeen, Cooper und Schrieffer 1957 ihre berühmte BCS-Theorie, welche die Supraleitung in Metallen beschreibt (Infokasten). Supraleitung ist darin nichts anderes als die Supraflüssigkeit geladener Elek-

tronenpaare. Die kritische Temperatur für die Supraleitung ist nicht etwa durch die Entartungstemperatur von Elektronen gegeben (diese beträgt viele 10 000 °C), sondern durch die viel kleinere Energieskala der Bindungsenergie von Cooper-Paaren. Zufällig entspricht deren Größenordnung der Entartungstemperatur des viel schwereren <sup>4</sup>He, was Kammerlingh-Onnes die Entdeckung der Supraleitung ermöglichte. Das bis zu den Experimenten an ultrakalten Fermi-Gasen einzige Beispiel einer neutralen fermionischen Supraflüssigkeit liefert <sup>3</sup>He: D. Osheroff, R. Richardson und D. Lee gelang es 1972, supraflüssiges <sup>3</sup>He bei 2,6 mK zu erzeugen, wofür sie 1996 den Nobelpreis erhielten. Die geringe Sprungtemperatur ist ein Maß für die Zerbrechlichkeit der Cooper-Paare.

Für fermionische Suprafluidität gibt es demnach zwei Erklärungen: ein Bose-Einstein-Kondensat aus kleinen Molekülen bei starker Anziehung und einen BCS-Zustand aus Cooper-Paaren mit langreichweitiger Wechselwirkung bei beliebig schwacher Bindung. Nach Vorarbeiten von Popov, Keldysh und Eagles zeigte Leggett 1980, dass der Übergang vom einen zum anderen Grenzfall weich ist. Die Größe der Fermionenpaare ändert sich dabei stetig mit der Wechselwirkung zwischen den Fermionen (Abb. 2). Entsprechend vergrößert sich die Paarbindungsenergie kontinuierlich von ihrem Wert im BCS-Limes (schwache Bindung) zu der großen Bindungsenergie eines Moleküls im BEC-Limes. Die kritische Temperatur wiederum entspricht der kleinen Bindungsenergie im BCS-Grenzfall und der Entartungstemperatur im Fall eines Bose-Einstein-Kondensats aus Molekülen. Der Übergang von BEC zu BCS findet dort statt, wo die Größe eines Moleküls etwa dem mittleren Teilchenabstand entspricht, also dort, wo die Zweikörperphysik auf die Vielteilchenphysik trifft. Dieser Übergangsbereich ist durch atomare Fermi-Gase nun erstmalig experimentell zugänglich.

## Ultrakalte Experimente

In supraflüssigem <sup>4</sup>He beträgt die Wahrscheinlichkeit, ein Atom im Kondensat vorzufinden, nur 10 %, obwohl das ganze System am absoluten Nullpunkt vollständig supraflüssig ist. Der Grund liegt in der starken Wechselwirkung, die Atome kohärent in höher gelegene Impulszustände anregt. Mit der Bose-Einstein-Kondensation in atomaren Gasen gelang es 1995, Kondensate in Reinstform zu erzeugen – hierfür und für die folgenden Studien erhielten E. Cornell, C. Wieman und W. Ketterle 2001 den Nobelpreis. Aufgrund der geringen Dichte dieser Gase lag die Sprungtemperatur unterhalb eines Mikrokelvins. Dieser Vorstoß zu ultrakalten Temperaturen öffnete ein völlig neues Feld in der Atomphysik, das die Kohärenz, die Supraflüssigkeit und viele weitere Eigenschaften dieser Kondensate untersucht und sie sich zunutze macht [2, 3].

Nun lag es nahe, die Quantenentartung auch mit Gasen aus fermionischen Atomen zu erreichen. Alle hierzu benötigten Techniken – die Laserkühlung von

<sup>1)</sup> So lässt sich <sup>4</sup>He als ein aus zwei Fermionen (<sup>4</sup>He<sup>-</sup>-Ion und ein Elektron) zusammengesetztes Boson vorstellen.

Atomen, ihre Speicherung in Magnetfallen, die Verdampfungskühlung, optische Fallen und Feshbach-Resonanzen – waren bereits für bosonische Gase entwickelt worden. Eine Komplikation ergab sich aber aus der Natur der Fermionen: Diese können im selben Spinzustand aufgrund des Pauli-Prinzips bei tiefen Temperaturen nicht kollidieren. Nur s-Wellen-, also Kopf-an-Kopf-Stöße, wären energetisch möglich, erfordern aber, dass sich die Fermionen beim Stoß am gleichen Ort befinden. Das verbietet sich jedoch, wenn sie sich im gleichen Spinzustand befinden. Als Folge bleiben Stöße, die während des Kühlens das thermische Gleichgewicht wiederherstellen sollen, schlichtweg aus, und das Gas thermalisiert nicht mehr. Daher benötigt man zwei unterschiedliche Spinzustände desselben Atoms oder eine weitere atomare Spezies als Kühlmittel. Aus demselben Grund werden sich zwei Fermionen nur dann räumlich symmetrisch paaren, wenn sie in zwei verschiedenen Spinzuständen vorliegen.

1999 haben B. DeMarco und D. Jin am JILA (Boulder, Colorado) in einem Spingemisch von fermionischem  $^{40}\text{K}$  das erste quantenentartete Fermi-Gas erzeugt. Bis Ende 2003 folgten sechs weitere Gruppen: in Florenz mit  $^{40}\text{K}$ , an der Rice University, an der ENS in Paris, in Duke, an der Universität Innsbruck und unsere Gruppe am MIT, alle mit fermionischem  $^6\text{Li}$ .

Nach diesem Meilenstein bestand ein großes Ziel der Forschung darin, die fermionische Suprafluidität in atomaren Gasen experimentell nachzuweisen. Hier ergab sich ein scheinbar unüberwindliches Problem: Die BCS-Theorie sagt für ein atomares Fermi-Gas mit typischen Wechselwirkungen (Van-der-Waals-Kräfte) eine unerreichbar niedrige Sprungtemperatur voraus:  $k_B T_c \approx E_F \exp(-\pi/2k_F|a|)$ . Die kritische Temperatur ist

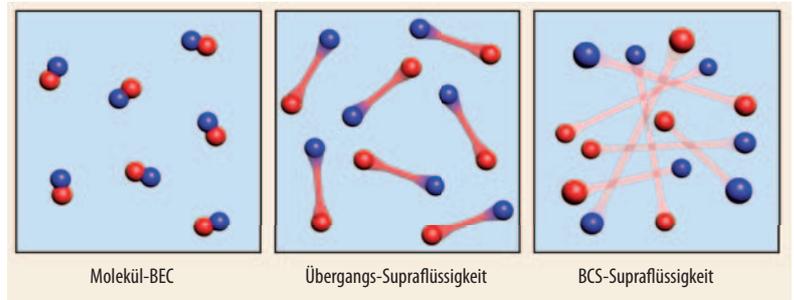


Abb. 2 Der BEC-BCS-Übergang in einem Gas aus wechselwirkenden spin up- (blau) und spin down-Fermionen (rot) geht von stark gebundenen Molekülpaaren (links) aus hin zu schwach gebundenen Cooper-Paaren (rechts).

zwar proportional zur Fermi- oder Entartungstemperatur  $E_F/k_B \approx 1 \mu\text{K}$ , die man seit 1995 unterschreiten kann, aber der exponentielle Faktor ist extrem klein:  $1/k_F \approx 100 \text{ nm}$  ist etwa der Teilchenabstand, und die Streulänge  $a$  – ein (Längen-)Maß für die interatomare Wechselwirkung – beträgt typischerweise  $|a| \leq 5 \text{ nm}$ . Damit ist  $T_c \approx 10^{-20} \text{ K}$ . Cooper-Paare sind demnach viel zu zerbrechlich, sodass der supraflüssige Zustand unerreichbar scheint.

### Heißes Rennen um kälteste Moleküle

Der Ausweg muss sein, die Wechselwirkung zu verstärken. Aus der Streuphysik sind solche Verstärkungen als Streuresonanzen bekannt. Diese treten immer dann auf, wenn das interatomare Potential gerade tief genug ist, um einen weiteren gebundenen Zustand aufzunehmen. Kollidierende Atome verbringen dann eine geraume Zeit in diesem gebundenen Zustand, auch wenn sie erkennen, dass ihre Energie nicht ganz

## BCS-THEORIE FÜR SUPRAFLÜSSIGKEITEN UND SUPRALEITER

Barden, Cooper und Schrieffer entwickelten ihre Theorie ursprünglich zur Erklärung der Supraleitung, ihr Ansatz ist aber weitaus mächtiger [4]. Die BCS-Theorie beschreibt allgemein die Bildung und Kondensation von Fermionenpaaren. Sie lässt sich auf allen Größenskalen auf verschiedenste Systeme der Natur erweitern: von der Paarung zwischen Kernbausteinen im Atomkern, die neutrale Flüssigkeit  $^3\text{He}$ , atomare Gase aus  $^6\text{Li}$  oder  $^{40}\text{K}$  bis zu Neutronensternen, in deren Kern eine Suprafluidität aus Quarks vermutet wird. Aller Wahrscheinlichkeit nach verdanken wir sogar die Masse der Elementarteilchen einem Mechanismus, welcher der Supraleitung direkt verwandt ist (Physik-Nobelpreis 2008 an Yoichiro Nambu).

Supraleiter und Suprafluidität haben viel gemein, der Unterschied liegt im (teilweise komplizierten) Detail, z. B. der Herkunft, Art und Stärke der Wechselwirkung zwischen den Fermionen, ob es sich um geladene oder neutrale Teilchen handelt, welche räumliche Symmetrie die Wellenfunktion der Paare hat und welchen Gesamtspin sie besitzen (Tabelle). Ein wichtiger Unterschied zwischen beiden Systemen sind Dichteschwankungen, die in Metallen aufgrund der Coulomb-Abstoßung stark

unterdrückt sind, in atomaren Gasen aber eine Rolle spielen. Des Weiteren ist im Gegensatz zu atomaren Stößen die Wechselwirkung zwischen Elektronen nur für niedrige Streuenergien attraktiv, begrenzt durch die charakteristische Frequenz der Gitterschwingungen (Debye-Frequenz).

Anregung oder Aufbrechen der Fermionenpaare kostet eine gewisse Mindestenergie, nämlich die „Bindungslücke“ (Gap)  $\Delta$ . Verein-

facht ist diese Anregungslücke im BCS-Limit die Ursache für die Suprafluidität und die Existenz einer kritischen Geschwindigkeit (es existieren jedoch auch Supraleiter ohne Gap). Wird die Wechselwirkung zwischen den Atomen resonant, z. B. nahe einer Feshbach-Resonanz, formen sie immer stabilere, kleinere Paare, was die kritische Temperatur auf  $k_B T_c \approx E_F$  erhöht. Denselben Wert findet man für ein Kondensat aus punktaktigen Bosonen.

### Vergleich zwischen Supraleiter und Suprafluidität

System	Supraleiter	Supraflüssiges, atomares Fermi-Gas
Fermion	Elektron (geladen)	Fermionische Atome (neutral)
Ausschluss von	Magnetfeldern	Rotationsfeldern
Wechselwirkung	Durch Gitterschwingungen (Phononen) übertragen, Wechselwirkungsstärke $V_{ee}$ abhängig vom Material	Van-der-Waals-Wechselwirkung, Streulänge $a$ beliebig einstellbar über Feshbach-Resonanzen
Energieskala der Wechselwirkung	Debye-Energie $\hbar\omega_D \ll E_F$	$\hbar^2/(mr_0^2)$ , gegeben durch Van-der-Waals-Reichweite $r_0$
Bindungslücke	$\Delta \approx \hbar\omega_D \exp(-1/\rho(0)V_{ee})$ mit der Zustandsdichte $\rho(0)$ bei $E_F$	$\Delta \approx E_F \exp(-\pi/2k_F a )$ bei schwacher Anziehung
Kritische Temperatur	$T_c \approx \Delta$	$T_c \approx \Delta$ bei schwacher Anziehung $T_c \approx E_F$ bei starker Bindung
Symmetrie der Paarwellenfunktion	Symmetrisch	Symmetrisch
Spin-Konfiguration	Elektronspin-Singulett	Singulett zweier Hyperfeinzustände

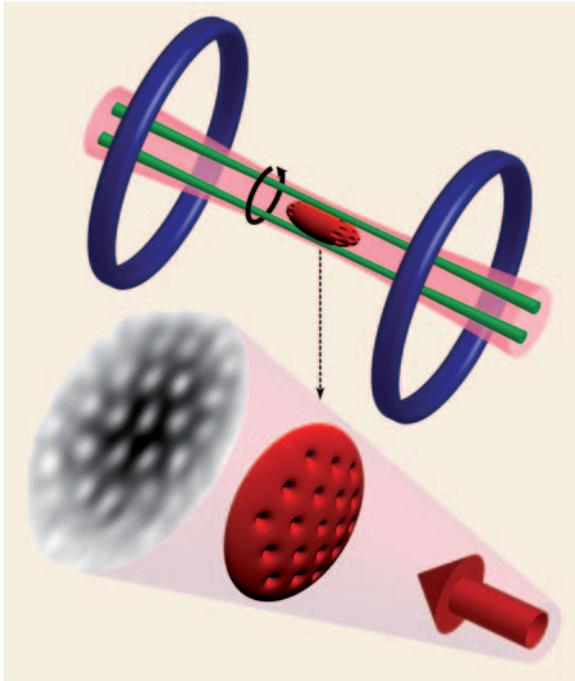


Abb. 3 Im Vortex-Experiment wird die Wolke aus Fermionenpaaren (rot) in einer optischen Falle gehalten (rosa). Magnetfeldspulen (blau) stellen die Wechselwirkung ein. Als „Löffel“, die die „Quantensuppe“ umrühren, dienen zwei grüne Laserstrahlen. Das Schattenbild nach der Expansion der Wolke (nun in Oblatenform) zeigt die Vortices als Löcher auf der Kamera.

ausreicht, um sich für immer zu binden. Das Streupotential zweier  ${}^6\text{Li}$ -Atome hat zufällig eine solche Streuresonanz, was zu einer sehr großen Streulänge  $a \approx -100 \text{ nm}$  führt. Das Minuszeichen deutet auf eine attraktive Wechselwirkung hin, wie sie für die Cooper-Paarung nötig ist. Aus diesem Grund galt  ${}^6\text{Li}$  bereits früh als aussichtsreicher Kandidat für eine fermionische Supraflüssigkeit. Die Situation ist sogar weitaus besser als erwartet: Es gibt gewisse Streuresonanzen, sog. Feshbach-Resonanzen, die vom Magnetfeld abhängen [5]. Man kann daher mithilfe eines angelegten Magnetfeldes die Streuparameter frei einstellen, also zwei Atome zu einem Molekül zusammenschweißen oder sie einander nur schwach anziehen lassen. Was zu gut klingt, um wahr zu sein, nutzte bei bosonischen Atomen wenig: Wann immer diese stark miteinander wechselwirken, lassen sie sich leicht in Drei-Körper-

Stöße verwickeln. Hierdurch entstehen tief gebundene Moleküle und schnelle Atome, und das Gas heizt sich auf. Die Lebensdauer des Gases war nahe einer Feshbach-Resonanz somit stark vermindert.

Daher überraschte es umso mehr, als die Gruppe in Paris 2003 zeigte, dass ein Fermi-Gas nahe einer Feshbach-Resonanz äußerst langlebig ist [1]. Bei nur zwei möglichen Spinzuständen trafen aufgrund des Pauli-Prinzips höchst selten drei Fermionen zusammen. Daher ließen sich stabile Moleküle aus zwei fermionischen Atomen erzeugen und in optischen Fallen einfangen, genau wie man es von bloßen Atomen gewohnt war. Ein heißes Rennen um die kältesten Moleküle begann; Ende 2003 berichteten die Gruppen aus Innsbruck, vom JILA und MIT von der Verwirklichung der Bose-Einstein-Kondensation aus Molekülen [6–8]. Genau genommen waren dies bereits die ersten Kondensate im BEC-BCS-Übergang, denn die Paargröße war nicht viel kleiner als der Teilchenabstand im Gas.

Bis zu diesem Moment lagen Fermionenpaar-Kondensate entweder als Kondensate eng gebundener Teilchen vor oder als solche schwach gebundener Cooper-Paare, wie sie in gewöhnlichen Supraleitern auftreten. Jetzt aber ließ sich mithilfe eines Magnetfeldes die Wechselwirkung zwischen Fermionen frei einstellen. Damit war es möglich, den Übergang zwischen dem BEC- und dem BCS-Bereich zu erforschen. Man war nun in der einzigartigen Lage, erstmalig zwei bisher getrennt existierende Formen fermionischer Paarung zu verbinden und dabei eventuell auf neue Physik zu stoßen. 2004 gelang es am JILA und dann am MIT, die Paar-Kondensation im gesamten BEC-BCS-Übergangsbereich experimentell nachzuweisen [9, 10]. Ähnlich wie in Abb. 2 wurde die Paargröße kontinuierlich verändert, ausgehend von kleinen Molekülen bis zu großen Paaren, die nur noch der umgebende Fermi-See zusammengehalten hat. Von 2004 bis Frühjahr 2005 folgten Experimente am JILA, MIT, in Innsbruck, Duke, Paris und Rice, welche die kollektiven Anregungen, die Energie des Gases, die Dynamik bei der Entstehung des Kondensats und die Natur der Paarung untersuchten.

### Nachweis durch Wirbel

Noch fehlte jedoch der direkte Nachweis, dass es sich bei dem neuartigen Zustand um eine Supraflüssigkeit handelte. Eine Reihe von Experimenten hatte zum Ziel, die hydro- und thermodynamischen Eigenschaften des Gases zu untersuchen; es ließ sich aber nicht entscheiden, ob man es mit einer Supraflüssigkeit oder nur einem „sehr flüssigen“, stark wechselwirkenden normalen Gas zu tun hatte [1]. Der Nachweis der Supraflüssigkeit gelang schließlich unserer Gruppe am MIT über die Beobachtung quantisierter Mini-Wirbel (Vortices) im rotierenden Fermi-Gas [11]. Quantisierte Vortices ergeben sich direkt aus der Existenz einer makroskopischen Wellenfunktion. Eine Supraflüssigkeit kann sich nicht als Ganzes drehen, sondern nimmt den Drehimpuls immer nur in singulären Wirbeln auf.

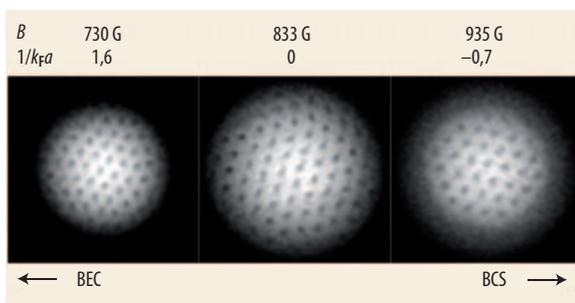


Abb. 4 Beim BEC-BCS-Übergang der Supraflüssigkeit werden geordnete Vortex-Gitter in einer fast  $1 \text{ mm}^2$  großen Fermi-Gaswolke auf der Molekül-(BEC-) Seite (links) sowie auf der BCS-Seite (rechts) der Feshbach-Resonanz beobachtet. Das Gas wurde unterschiedlichen Magnetfeldern  $B$  und entsprechenden Wechselwirkungsparametern  $1/k_F a$  ausgesetzt.

Der Eigendrehimpuls jedes einzelnen Wirbels beträgt pro Boson bzw. Fermionenpaar gerade ein Plancksches Wirkungsquantum  $\hbar$ . Da sich gleichumlaufende Wirbel abstoßen, ordnen sich die Vortices in einem Gitter an, dem Abrikosov-Gitter. Dieselbe Physik beobachtet man in Supraleitern vom Typ II in einem Magnetfeld: Der Rotation in neutralen Flüssigkeiten entspricht ein angelegtes Magnetfeld in geladenen Flüssigkeiten. Magnetflusslinien sind daher ebenfalls quantisiert und ordnen sich in einem Abrikosov-Gitter an.

Im Experiment war das stark wechselwirkende Fermi-Gas aus  $^6\text{Li}$ -Atomen in einer teils optischen, teils magnetischen Falle gefangen (Abb. 3). Ein äußeres Magnetfeld erlaubte es, die Streueigenschaften des Gases über eine Feshbach-Resonanz auf einen Wert im BEC-BCS-Übergang einzustellen. Zwei grüne Laserstrahlen umliefen die gefangene Atomwolke in schneller Drehung und versetzten das Gas in Rotation. Dann wurde das Gas aus der Falle entlassen, wodurch sich die Vortices sowie die Atomwolke vergrößerten. Eine CCD-Kamera bildete den Schatten des Gases entlang der Rotationsachse ab. Die Vortices zeigten sich als Löcher in der Wolke (Abb. 4) und erbrachten den Nachweis der Supraflüssigkeit von Fermi-Gasen.

Das Übergangskondensat, das in diesen Experimenten mit ultrakalten atomaren Gasen realisiert wurde, ist ein neuer Typ fermionischer Supraflüssigkeit. Es zeichnet sich durch seine im Vergleich zur Fermi-Temperatur  $T_F$  sehr hohe Sprungtemperatur  $T_C$  aus (Tab. 1). Aufgrund der starken Wechselwirkung, die sich durch die Feshbach-Resonanz einstellen lässt, können atomare Fermi-Gase bereits bei  $T_C/T_F \approx 0,2$  den supraflüssigen Zustand einnehmen. Dies begründet die Bezeichnung „Hochtemperatur-Supraflüssigkeit“ für dieses Phänomen, obwohl es bei ultrakalten 100 nK stattfindet. Skaliert auf die Dichte von Elektronen in Festkörpern würde diese Form der Supraflüssigkeit bereits weit oberhalb der Raumtemperatur eintreten.

Die 1986 entdeckten Hochtemperatur-Supraleiter (Nobelpreis 1987 an G. Bednorz und A. Müller) warten noch heute auf eine weithin akzeptierte theoretische Beschreibung. Einige Eigenschaften dieser Systeme finden ihre Entsprechung in Gasen aus fermionischen Atomen im BEC-BCS-Übergang. Da die Paargröße (oder auch Korrelationslänge) etwa dem Teilchenabstand entspricht, handelt es sich in beiden Fällen um eine stark wechselwirkende „Suppe“ aus Teilchen,

System	$T_C$	$T_F$	$T_C/T_F$
Metallische Supraleiter (typ.)	1 – 10 K	50 000 – 150 000 K	$10^{-4} - 10^{-5}$
$^3\text{He}$	2,6 mK	5 K	$5 \cdot 10^{-4}$
Hochtemperatur-Supraleiter	35 – 140 K	2000 – 5000 K	$10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$
Neutronensterne	$10^{10}$ K	$10^{11}$ K	$10^{-1}$
Stark wechselwirkende Fermi-Gase	200 nK	1 $\mu\text{K}$	0,2

Tab. 1 Sprungtemperatur, Fermi-Temperatur und ihr Verhältnis hängen stark vom fermionischen System ab. Stark wechselwirkende Fermi-Gase halten den Rekord, sie sind eine „Hochtemperatur-Supraflüssigkeit“ bei ultrakalten Temperaturen.

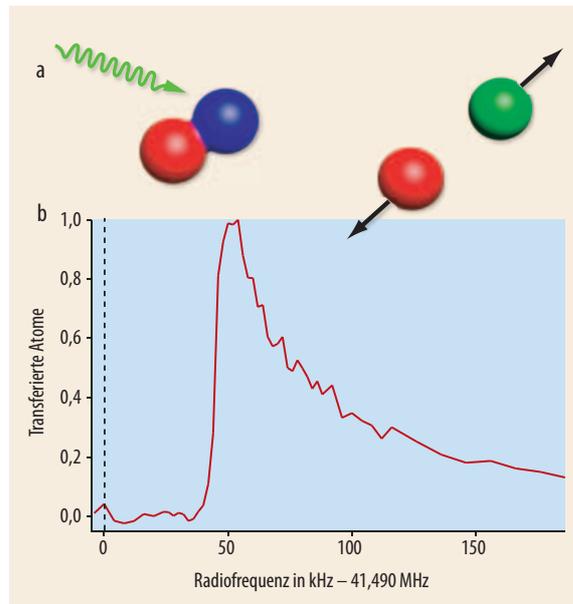


Abb. 5 Bei der Spektroskopie an Fermionen-Paaren im BEC-BCS-Übergang regt ein RF-Photon ein gebundenes Atom (blau) zum Übergang in einen freien Zustand (grün) an (a). Die drei Farben stehen für unterschiedliche Kernspin-Zustände der Atome. Freie, ungebundene Atome würden in diesem Beispiel bei 41,490 MHz in den dritten (grünen) Zustand übertragen werden (gestrichelte Linie). Da Paare aber erst getrennt werden müssen, ist das RF-Spektrum im BEC-BCS-Übergang zu positiven Frequenzen verschoben (b). Verschiebung und Breite des Spektrums sind ein Maß für die Bindungsenergie der Paare [12].

in denen Partnertausch an der Tagesordnung ist. In diesen Systemen ist der normale Zustand oberhalb der kritischen Temperatur alles andere als ein gewöhnliches Fermi-Gas. Die Wechselwirkung reicht immer noch aus, um unkondensierte Paare zu bilden. Die Forschung an atomaren Fermi-Gasen soll Aufschluss über diesen noch obskuren Teil des Phasendiagramms geben.

### Bei der Paarbildung zusehen

Lässt sich die Paarung von Fermionen in der Supraflüssigkeit direkt nachweisen? Man müsste dazu in der Lage sein, ein Fermion von seinem Partner zu trennen und die dazu notwendige Energie zu messen. Genau dies lässt sich mithilfe der Radiofrequenz-Spektroskopie erreichen, bei der man einen der beiden Spinzustände (z. B. spin up, blau in Abb. 5) in einen unbesetzten, im Idealfall nichtwechselwirkenden, dritten Spin-Zustand („spin 3“, grün) überführt.<sup>2)</sup> In Abwesenheit der Paarungspartner (spin down, rot) ist die nötige Radiofrequenz aus der Atomphysik exakt bekannt. Kommt der Partner hinzu, verschiebt sich die Resonanzbedingung aufgrund der Wechselwirkung. Im BEC-Limes aus eng gebundenen Paaren reduziert sich die Aufgabe auf Molekülspektroskopie. Sobald die Radiofrequenz ausreicht, ein Molekül aufzubrechen, lässt sich das spin up-Atom in den dritten Zustand überführen. Im Prinzip ändert sich an dieser qualitativen Beschreibung im gesamten BEC-BCS-Übergang nichts. Aus Molekülen werden immer größere Fermi-

2) Die Zustände spin up, spin down und spin 3 entsprechen verschiedenen Hyperfeinzuständen, also den Einstellungen des Kern- und Elektronenspins der Atome. Im Lithium-6-Atom hat der Elektronenspin zwei mögliche Einstellungen, der Kernspin drei. Daraus resultieren sechs Hyperfeinzustände. In unserem Experiment bleibt die Ausrichtung des Elektronenspins immer gleich, die des Kernspins lässt sich einstellen.

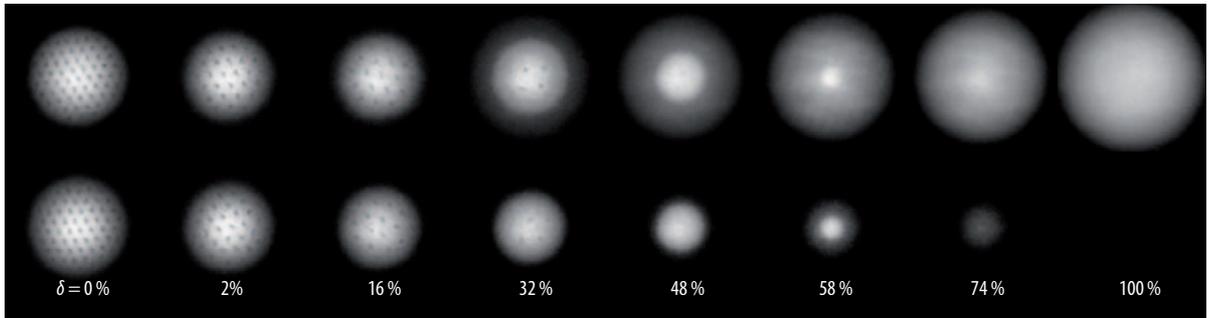


Abb. 6 Eine Mischung, in der die Hyperfeinzustände in  ${}^6\text{Li}$ , spin up (oben) und spin down (unten), zu gleichen Teilen vorliegen, ist vollkommen supraflüssig. Der supraflüssige Kern verschwindet bei höherem Ungleichgewicht, das definiert

ist als  $\delta = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow})$ . Oberhalb eines kritischen Verhältnisses, hier auf der BEC-Seite nahe der Feshbach-Resonanz, von 85 % spin up und 15 % spin down ( $\delta = 70\%$ ) bleibt eine normale Mischung zurück. Vortices lassen sich

schon bei geringerem Ungleichgewicht aufgrund erhöhter Reibung nicht mehr einfach erzeugen, ein dichter Kondensatskern dient daher als der deutlichere Marker für Supraflüssigkeit (bei  $\delta = 58\%$  noch als weißer Kern zu erkennen).

onenpaare, die Bindungsenergie wird also kleiner und das Spektrum zu kleineren Radiofrequenzen verschoben. Auf diese sehr direkte Art konnten C. Schunck und seine Mitarbeiter zeigen, dass die Paargröße im BEC-BCS-Übergang tatsächlich etwa dem mittleren Teilchenabstand entspricht [12]. Die Messung der Paarbindungsenergie ist ein schönes Beispiel dafür, wie sich Vielteilchenphänomene mithilfe präziser atomphysikalischer Methoden untersuchen lassen; hier sogar auf eine Weise, die in der Festkörperphysik nicht möglich ist. Allerdings steht die Methode in einer interessanten Verwandtschaft zu den berühmten Tunnelexperimenten zwischen normalen und Supraleitern. Dabei werden Elektronen aus dem Supraleiter durch Tunneln in das normale Metall überführt, sofern dort Platz für das tunnelnde Elektron ist – also nur für Endzustände oberhalb der Fermi-Energie. Damit misst man im Unterschied zur RF-Spektroskopie die Bindungsenergie an der Fermi-Kante, die sog. supraflüssige Bindungslücke.

### Singles stören beim Paartanz

Die notwendige Voraussetzung für eine fermionische Supraflüssigkeit ist die Paarung von Fermionen, ob sie nun in einem ultrakalten Fermi-Gas, im Supraleiter oder in einem Neutronenstern stattfindet. Was aber passiert, wenn nicht jedes Fermion einen Partner findet? Wir illustrieren diese Situation gerne mit der Metapher eines Tansaals, in dem sich mehr Herren als Damen befinden. Sind nur wenige „Singles“ anwesend, fühlen sich die Paare ungestört und setzen ihren suprafluiden Tanz fort. Ab einer kritischen Anzahl an damenlosen Herren sehen sich die tanzenden Paare zu vielen neidischen Blicken ausgesetzt und brechen den Tanz ab. Dies beschreibt den Zusammenbruch der Supraflüssigkeit durch ein Ungleichgewicht aus Herren und Damen. Hierbei gilt: Je lockerer der Tanz, je größer also die Entfernung der Tanzpartner und je schwächer demnach ihre Wechselwirkung, desto stärker lassen sie sich von den umstehenden Einzelgängern stören. Dies zeigt, dass der Grund des Zusammenbruchs in der Zerbrechlichkeit der Cooper-Paarung liegen muss. Man kann ihn wie folgt verste-

hen: Teilchen tief im Innern des Fermi-Sees können nicht an der Paarung teilnehmen, ja nicht einmal an anderen Teilchen streuen, da ihre Bewegung durch das Pauli-Prinzip völlig eingefroren ist. Kollisionen und Paarung finden nur an der Oberfläche des Fermi-Sees statt, bei der Fermi-Energie. Gibt es allerdings unterschiedlich viele spin up- und spin down-Atome, so sind auch die beiden Fermi-Energien verschieden. Falls die Paarungsenergie nicht ausreicht, um diesen Energieunterschied zu überbrücken, finden spin up-Atome keine freien Kollisions- oder Paarungspartner unter den spin down-Atomen. Die Paarung und damit die Supraflüssigkeit bricht zusammen.

Vorhergesagt wurde dieser Zusammenbruch 1962 von A. M. Clogston und B. S. Chandrasekhar für Supraleiter, die einem hohen Magnetfeld ausgesetzt sind. Dieses bewirkt über den Zeeman-Effekt eine Aufspaltung der Fermi-Energien, eine Energieaufspaltung zwischen spin up- und spin down-Elektronen. Wird diese größer als die suprafluide Bindungslücke, so spalten sich die Paare auf, und die Supraleitung bricht zusammen. Leider gelang es nicht, diesen Effekt, der auch Pauli-Limit heißt, in gewöhnlichen Supraleitern zu erreichen: Der Meißner-Effekt verhindert das Eindringen eines Magnetfeldes in den Supraleiter. Wenn überhaupt, kann ein Magnetfeld nur in quantisierten

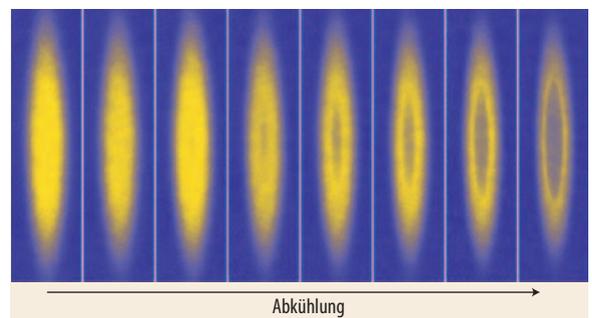


Abb. 7 Direkte Beobachtung des supraflüssigen Phasenübergangs in ungleichen Mischungen. Die Phasenkontrastaufnahme zeigt die Dichtedifferenz zwischen spin up- und spin down-Atomen. Unterhalb einer kritischen Temperatur bildet sich ein supraflüssiger Kern, der vollständig gepaart ist und in dem somit die spin up- und spin down-Atome je 50 Prozent der Dichte ausmachen. Ungepaarte „Singles“ sammeln sich in einer Schale um den Kern.

Flusslinien in den Supraleiter eindringen, eben jenen Vortices, von denen bereits die Rede war. Lange bevor das Pauli-Limit erreicht ist, wird die Dichte der Vortices so groß, dass die Supraleitung zusammenbricht.

In ultrakalten Gasen lässt sich jedoch das Ungleichgewicht zwischen spin up- und spin down-Atomen beliebig einstellen. So fanden wir in unserem Experiment heraus, bei welchem kritischen Wert die Supraflüssigkeit zusammenbricht (Abb. 6) [13]. Ab einem bestimmten Mischungsverhältnis der beiden Zustände sind keine Vortices mehr zu beobachten, und das Fermi-Paar-Kondensat verschwindet. Am Übergangs-Punkt, genau zwischen BEC- und BCS-Limes, ergibt sich ein kritisches Mischungsverhältnis von 85 % „Herren“ zu 15 % „Damen“.

Solange noch ein Kern aus supraflüssigen Paaren besteht, kommt es zu einer Phasenseparation: Die „Singles“ drängeln sich am Rand des Tansaales, während in der Mitte eine 50/50-Mischung aus gepaarten Teilchen tanzt. Dies lässt sich mithilfe einer Phasenkontrastabbildung direkt sichtbar machen (Abb. 7) [1, 3]. Diese Technik erlaubt es, den Phasenübergang von einer normalen zu einer supraflüssigen Phase zu beobachten. Oberhalb der kritischen Temperatur ist eine normale Mischung ohne koordinierten Tanz zu sehen. Sobald man aber die kritische Temperatur unterschreitet, bildet sich in der Mitte der Atomwolke ein supraflüssiger, gepaarter Kern [14].

Diese Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die Supraflüssigkeit im Kern ungleich gemischter Gase nicht von der in gleichen Fermi-Mischungen unterscheidet. Ein weiterer, seit Jahrzehnten vorhergesagter „exotischer Tanz“, der Singles in den Reihen der Tanzpaare zulässt, der Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov-Zustand (FFLO) aus Cooper-Paaren mit endlichem Impuls, wurde bisher nicht beobachtet. Bislang ist aber nicht auszuschließen, dass dieser nicht doch in der Grenzregion zwischen Kern und äußerer Schale auftritt.

## Die richtige Mischung macht's

Die vorgestellten Experimente zu ungleichen Fermi-Mischungen schaffen direkte Verbindungen zu anderen Bereichen der Physik. So besteht der Atomkern aus einem meist ungleichen Gemisch aus Protonen und Neutronen. Im Innern von Neutronensternen wird eine Supraflüssigkeit aus Quarks vermutet, die ebenfalls ein ungleiches Fermi-Gemisch darstellt. Auch in besonderen Supraleitern mit hoher effektiver Elektronenmasse ist es möglich, ein spin up-spin down-Ungleichgewicht einzustellen und das Pauli-Limit zu beobachten. So haben Experimente aus der Atomphysik eine enge Beziehung zur Kern-, Astro- und Festkörperphysik herstellen können [1].

In ultrakalten Fermi-Gasen lassen sich praktisch alle Parameter wie Dichte, Temperatur, Dimensionalität und vor allem die Wechselwirkung beliebig einstellen. Dies eröffnet die Möglichkeit, sich den großen Rätseln neu zu nähern, die uns durch stark wechselwirkende

Fermionen aufgegeben sind: von der Frage nach dem Ursprung des Universums über Neutronensterne, der Kernmaterie bis zu stark korrelierten Materialien in der Festkörperphysik. Zu den prominentesten Beispielen zählen die Hochtemperatur-Supraleiter und Quantenmagnete. Ultrakalte Fermi-Gase, die in optischen Gittern eingesperrt sind, werden sich in den nächsten Jahren zur Simulation von Modellen einsetzen lassen, die solche Phänomene zu beschreiben versuchen. Man fragt also die Natur nach der Antwort, nicht den Computer. Hier möchte ich nur auf Arbeiten mit Fermionen in optischen Gittern der Gruppen in Zürich (T. Esslinger), Hamburg (K. Sengstock), am MIT (W. Ketterle) und in Mainz (I. Bloch) verweisen [15]. Darüber hinaus lassen sich neuartige Systeme herstellen, z. B. Mischungen aus drei verschiedenen Fermionen (Heidelberg, Penn State, MIT), aus Bosonen und Fermionen [5] und Mischungen aus zwei verschiedenen fermionischen Spezies (München, Innsbruck, Eindhoven, MIT). Diese Arbeiten werden unser Verständnis stark wechselwirkender Fermionen vertiefen und uns vielleicht einen Weg aufzeigen, neue Materialien mit Eigenschaften nach Maß herzustellen. Ein Traum wäre schließlich die Erzeugung eines Raumtemperatur-Supraleiters.

### Literatur

- [1] W. Ketterle und M. W. Zwierlein, Proceedings of the International School of Physics „Enrico Fermi“, Course CLXIV, Varenna, 20 – 30 June 2006, hrsg. von M. Inguscio, W. Ketterle und C. Salomon (IOS Press, Amsterdam) 2008, preprint arXiv:0801.2500
- [2] W. Ketterle und M. O. Mewes, Physikalische Blätter, Juni 1996, S. 573
- [3] W. Ketterle, Physikalische Blätter, Juli 1997, S. 677
- [4] D. Vollhardt und P. Wölfle, Physik Journal, Januar 2008, S. 43
- [5] K. Bongs und K. Sengstock, Physik Journal, Februar 2008, S. 33
- [6] S. Jochim et al., Science **302**, 2101 (2003)
- [7] M. Greiner, C. A. Regal und D. S. Jin, Nature **426**, 537 (2003)
- [8] M. W. Zwierlein et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 250401 (2003)
- [9] C. A. Regal, M. Greiner und D. S. Jin, Phys. Rev. Lett. **92**, 040403 (2004)
- [10] M. W. Zwierlein et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 120403 (2004)
- [11] M. W. Zwierlein et al., Nature **435**, 1047 (2005)
- [12] C. H. Schunck, Y. Shin, A. Schirotzek und W. Ketterle, Nature **454**, 739 (2008)
- [13] M. W. Zwierlein, A. Schirotzek, C. H. Schunck und W. Ketterle, Science **311**, 492 (2006)
- [14] Y. Shin, M. W. Zwierlein, C. H. Schunck, A. Schirotzek und W. Ketterle, Phys. Rev. Lett. **97**, 030401 (2006)
- [15] K. Bongs und K. Sengstock, Physik Journal, Mai 2005, S. 18

### DER AUTOR

**Martin Zwierlein** (FV Atomphysik, Quantenoptik/Photonik) studierte Physik in Bonn und Paris. 2006 wurde er bei Wolfgang Ketterle am MIT mit einer Arbeit über Suprafluidität in ultrakalten Fermi-Gasen promoviert. Nach einem Postdoc-Aufenthalt in der Gruppe von Immanuel Bloch an der Universität Mainz trat er 2007 eine Stelle als Assistant Professor of Physics am MIT an. Schwerpunkte seiner Arbeit sind neue Materiezustände in ultrakalten atomaren Gasen und ihre Verwendung als Modellsysteme für Vielteilchentheorien. Er ist Alfred P. Sloan Fellow und erhielt für seine Forschungsarbeiten den Klung-Wilhelmy-Weberbank-Preis (2007).

