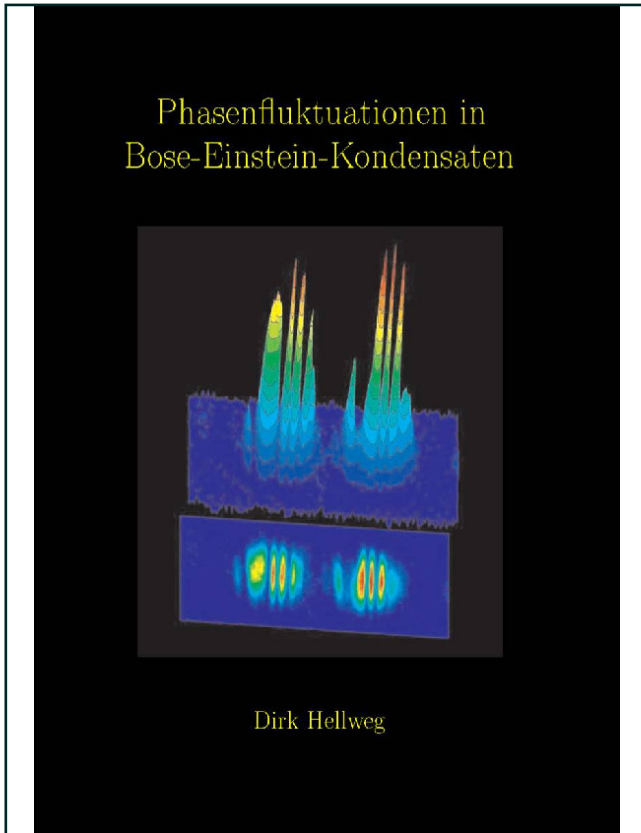




Dirk Hellweg (Autor)

Phasenfluktuationen in Bose-Einstein-Kondensaten



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/3149>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

EINLEITUNG

Mit der Bose-Einstein-Kondensation in verdünnten atomaren Gasen, die erstmals 1995 gelang [1, 2, 3], wurde ein fundamentaler quantenstatistischer Effekt experimentell zugänglich gemacht. Damit eröffnete sich ein neues Forschungsfeld, das aufgrund der außergewöhnlichen Eigenschaften der Bose-Einstein-Kondensate sowohl die Untersuchung grundlegender quantenmechanischer Fragestellungen erlaubt als auch ganz neue Anwendungsperspektiven bietet. Die Bose-Einstein-Kondensation wurde schon 1925 von Einstein vorausgesagt¹ [5]. Inspiriert von de-Broglie's Konzept der Materiewellen übertrug Einstein dabei von N. Bose vorgenommene Betrachtungen [6] zur Photonstatistik auf ideale atomare Gase. Er zeigte, dass unterhalb einer kritischen Temperatur ein Großteil der Atome in nur einen Quantenzustand, den Grundzustand des Systems, übergeht, d.h. „kondensiert“. Die erste Anwendung fand diese Theorie im Jahr 1938 bei der Erklärung der Superfluidität von ^4He durch London [7]. Er führte auch das bis heute verwendete Konzept einer makroskopischen Wellenfunktion ein. Inspiriert durch die Eigenschaften flüssigen Heliums wurde in den folgenden Jahren ein großer Teil der theoretischen Grundlagen der Bose-Einstein-Kondensation in homogenen Systemen durch eine Reihe bedeutender Arbeiten von u.a. Tisza [8], Landau [9], Bogoliubov [10] und Pitaevskii [11] gelegt. Da ^4He eine Flüssigkeit ist, ist sein Verhalten durch Wechselwirkungen dominiert. Dies hat zur Folge, dass sich selbst für Temperaturen weit unterhalb der Übergangstemperatur nur etwa 10% der Atome im Kondensatanteil befinden. Daher war ein wesentliches Ziel die Realisierung einer „reinen Form“ der Bose-Einstein-Kondensation in schwach wechselwirkenden atomaren Gasen, ohne die Komplikationen der relativ starken Wechselwirkungen einer Flüssigkeit.

¹Einsteins Veröffentlichung erschien vor der Entwicklung der Quantenmechanik und vor der Unterscheidung zwischen Bosonen und Fermionen. Eine ausführlichere Betrachtung der historischen Entwicklung befindet sich in [4].

Als aussichtsreichster Kandidat galt lange Zeit spinpolarisierter Wasserstoff², da er als einziges Element am Temperaturnullpunkt gasförmig bleibt [15, 16]. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Molekülbildung auch für viele andere verdünnte atomare Gase kein ernsthaftes Hindernis darstellt, da sie häufig erheblich langsamer abläuft als die zur Kondensation benötigte Zeit.

In einem vereinfachten Bild sind Atome als Wellenpakete der Ausdehnung ihrer thermischen de-Broglie-Wellenlänge beschreibbar. Die Bedingung zur Realisierung der Bose-Einstein-Kondensation ist, dass sich die atomaren Wellenpakete maßgeblich überlappen. Diese Bedingung stellt jedoch in verdünnten atomaren Gasen sehr hohe experimentelle Anforderungen, da sie extrem niedrige Temperaturen, typischerweise im Nanokelvin-Bereich erfordert. Um dieses zu erreichen, bedurfte es der Entwicklung neuer Methoden der Atomphysik: der Laserkühlung, der Speicherung kalter neutraler Atome und der evaporativen Kühlung. Die Laserkühlung wurde sehr erfolgreich für Alkali-Atome angewandt und ermöglichte die Präparation kalter, atomarer Ensembles im μK -Bereich und das Fangen dieser Atome in der 1987 demonstrierten magneto-optischen Falle [17]. Zur weiteren Erhöhung der Phasenraumdichte wird das lasergekühlte Ensemble zumeist in ein konservatives magnetisches oder optisches Potenzial geladen und die energiereichsten Atome werden sukzessive aus dem Fallenpotenzial entfernt. Diese evaporative Kühlung verringert die Gleichgewichtstemperatur des Systems und wird bis zum Erreichen der Kondensationstemperatur fortgesetzt.

Seit der erstmaligen Realisierung im Jahr 1995 mit Alkali-Atomen hat sich die Bose-Einstein-Kondensation nahezu explosionsartig zu einem eigenständigen Forschungsgebiet mit vielfältigen Verbindungen zu verschiedensten Bereichen der Physik entwickelt. Die Anzahl der mittlerweile etwa 40 Experimente zur Bose-Einstein-Kondensation und der experimentellen und theoretischen Veröffentlichungen ist auch weiterhin steigend. Ebenso ist absehbar, dass die Zahl der kondensierten Elemente weiterhin ansteigen und durch die unterschiedlichen atomaren Eigenschaften die experimentellen Möglichkeiten erweitern wird. Insbesondere Erdalkali-Atome und Edelgase, deren Kondensation im metastabilen Zustand vor kurzem für Helium gelungen ist [18, 19], bieten vielversprechende, neue Perspektiven. Die Erdalkali-Atome besitzen sehr schmale Dipol-verbotene Übergänge und sind damit aussichtsreiche Kandidaten für Präzisionsmessungen basierend auf Bose-Einstein-Kondensaten. Die Edelgase bieten aufgrund der hohen Energie des metastabilen Zustandes neuartige Detektionsmöglichkeiten

²Das Erreichen der Bose-Einstein-Kondensation in Wasserstoff [12] ist trotz der intensiven Arbeiten seit etwa 1980 [13, 14] erst 1998 gelungen. Zu den Gründen zählen die ungünstige atomare Übergangsfrequenz von 121 nm, die die Verwendung kryogener Kühlmethode erfordert, und schwierige Stoßeigenschaften. Die dort entwickelten Techniken, insbesondere die evaporative Kühlung, haben aber wesentliche Voraussetzungen für die deutlich zuvor erreichte Kondensation der Alkali-Atome geschaffen.

und eröffnen damit Perspektiven für detaillierte Untersuchungen der Quantenstatistik.

Das enorme Interesse an der Bose-Einstein-Kondensation begründet sich durch die einzigartigen Eigenschaften dieser Quantengase. Das Kondensat kann durch die vielfache Besetzung der Wellenfunktion eines einzigen Quantenzustandes beschrieben werden, dessen Ausdehnung mehrere $100\ \mu\text{m}$ betragen kann. Es handelt sich also um ein sehr reines, gezielt manipulierbares makroskopisches Quantenobjekt, bei dem eine Kontrolle über die Bewegung und Position der Atome erlangt wird, die nur durch die Heisenbergsche Unschärferelation begrenzt ist. Zudem kann der Betrag der Wellenfunktion, der die atomare Dichteverteilung beschreibt, optisch abgebildet werden und liefert experimentelle Signale hohen Informationsgehalts.

Schon heute ist abzusehen, dass Bose-Einstein-Kondensate den Ausgangspunkt für viele Anwendungen und weiterführende Experimente darstellen werden. Die (Photonen-)Optik wurde durch den Laser als Quelle kollimierter, kohärenter Strahlung revolutioniert. Daher stößt der sogenannte Atomlaser, bei dem Bose-Einstein-Kondensate als Quelle kohärenter Materiewellen genutzt werden, auf großes Interesse. Durch die Auskopplung von Atomen aus einem Bose-Einstein-Kondensat ist es bereits gelungen, gepulst [20, 21] und für eine kurze Zeit kontinuierlich [22] kohärente Materiewellen zu extrahieren. Diese Entwicklungen eröffnen ein neues Gebiet der Atomoptik, die kohärente Atomoptik, die die Entwicklung kohärenzerhaltender optischer Elemente wie Spiegel [23], Strahlteiler und Linsen erfordert. Als weitere Anwendung wird die Verwendung von Bose-Einstein-Kondensaten für Präzisionsmessungen diskutiert [24]. So wurde gezeigt, dass im Gegensatz zu konventionellen Atomquellen mit Bose-Einstein-Kondensaten prinzipiell eine quantenlimitierte Messgenauigkeit erreicht werden kann [25]. Darüber hinaus können evaporativ gekühlte bosonische Atomwolken zum sympathetischen Kühlen [26] anderer Spezies genutzt werden. Mit dieser Methode ist es beispielsweise gelungen, quantenentartete atomare Fermigase herzustellen [27, 28, 29], die Grund zur Hoffnung geben, den BCS-Übergang in atomaren Fermigasen beobachten zu können. Der Einsatz optischer Gitter eröffnet ausgehend von Bose-Einstein-Kondensaten das neue Forschungsgebiet stark-wechselwirkender atomarer Gittergase. Insbesondere mit dem kürzlich demonstrierten MOTT-Isolator-Übergang [30, 31] können Fock-Zustände mit einer genau definierten Atomzahl pro Gitterplatz erzeugt werden. Diese Entwicklungen bieten Perspektiven für die Quanteninformationsverarbeitung [32], die Quantenchemie und die Erzeugung molekularer Bose-Einstein-Kondensate [33].

Den wesentlichen Unterschied zu thermischen Atomverteilungen bilden die Kohärenzeigenschaften der Bose-Einstein-Kondensate. Auf diesen basieren viele der möglichen Anwendungen und ein beträchtlicher Teil der faszinierenden Eigenschaften der Kondensate. Hierzu gehören die Superfluidität, quantisierte Vor-

tices [34, 35], Interferenzeffekte und der Josephson-Effekt [36, 37]. Daher stand die Phasenkohärenz schnell im Zentrum des experimentellen Interesses und wurde für dreidimensionale Kondensate durch interferometrische [38, 39] und spektroskopische [40] Messungen für Temperaturen weit unterhalb der Kondensationstemperatur und selbst für höhere Temperaturen durch Radiofrequenz-Auskopplung [41] bestätigt. Von großem Interesse in diesem Zusammenhang sind niederdimensionale Quantengase [42, 29], in denen die atomare Bewegung in eine oder zwei Raumrichtungen auf die Nullpunktsoszillation beschränkt ist, da sich ihre Eigenschaften qualitativ von dreidimensionalen Systemen unterscheiden. Es wurde insbesondere vorausgesagt, dass eindimensionale [43] und auch sehr elongierte, dreidimensionale Kondensate [44] starke räumliche und zeitliche Fluktuationen der Phase zeigen. Die Kohärenzeigenschaften sind daher dramatisch verändert und resultieren in einer Verringerung der Phasenkohärenzlänge, die erheblich kleiner als die Kondensatlänge sein kann. Solche Kondensate werden als Quasikondensate bezeichnet.

Ziel dieser Arbeit war es, die Kohärenzeigenschaften elongierter Bose-Einstein-Kondensate zu untersuchen. Besonderes Interesse galt dabei der Fragestellung der Existenz von Phasenfluktuationen und der Untersuchung des Einflusses der Fallengeometrie auf die Kohärenzeigenschaften. Da viele Bose-Einstein-Kondensate in elongierten Fallen erzeugt werden und besonders der kürzlich demonstrierte Einsatz von Mikrochips [45, 46] die Möglichkeit extrem elongierter Potentiale bietet, ist diese Fragestellung sowohl für das konzeptionelle Verständnis der Bose-Einstein-Kondensation als auch für viele Anwendungen relevant.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 wird zunächst ein kurzer Überblick über die theoretischen Grundlagen der Bose-Einstein-Kondensation gegeben. Darüber hinaus wird auf die experimentelle Erzeugung und die für die interferometrischen Messungen verwendete Manipulation von Bose-Einstein-Kondensaten mithilfe der Bragg-Beugung eingegangen.

In Kapitel 3 wird die theoretische Beschreibung der Phasenfluktuationen erläutert. Insbesondere wird eine analytische Theorie der Expansion phasenfluktuerender Kondensate gegeben und die Berechnung der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung vorgestellt, die für die interferometrische Messung der räumlichen Korrelationen benötigt wurde. Es sei an dieser Stelle betont, dass sich trotz ihrer getrennten Darstellung die theoretischen Arbeiten und die experimentellen Messungen mehrmals wechselseitig befruchtet haben.

Um möglichst geeignete Bedingungen zur Untersuchung der Phasenfluktuationen zu schaffen, wurde die bestehende BEC-Apparatur optimiert. Diese Arbeiten werden in Kapitel 4 beschrieben und beinhalten insbesondere die Erzeugung stark elongierter Fallenpotentiale, die Kondensation im magnetisch schwächer gefangenen $F = 1$ Zustand und die Verbesserung der Detektion.