

# Abgehobener Atomchip

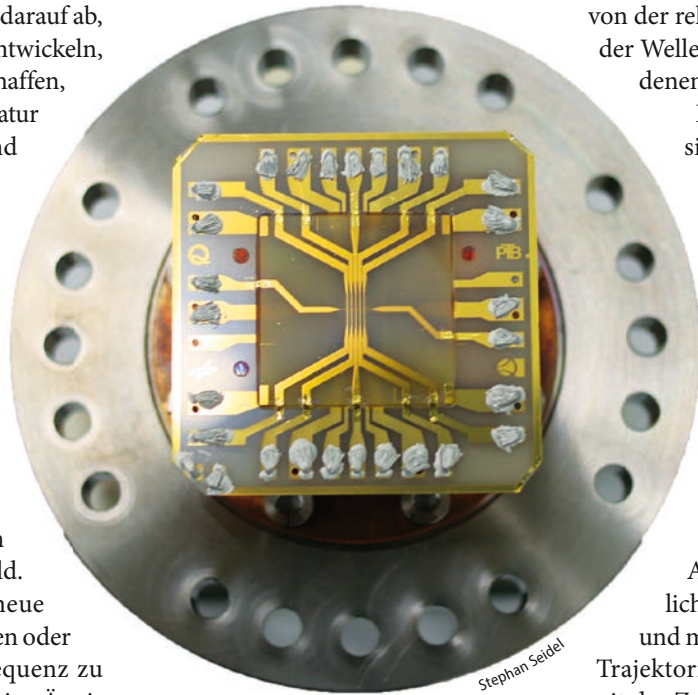
Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten im Weltraum können den Weg weisen zu Neuer Physik.

Kai Bongs

Die Physik zielt nicht nur darauf ab, neue Technologien zu entwickeln, sondern auch Modelle zu schaffen, welche die Phänomene der Natur um uns herum erklären und Vorhersagen ermöglichen. Bisher gibt es jedoch keine allgemein akzeptierte und experimentell überprüfte Theorie, welche die Gravitation mit den anderen Wechselwirkungen zu einer universellen Theorie kombiniert. Auch Dunkle Materie und Dunkle Energie stellen weiterhin besondere Herausforderungen an unser physikalisches Weltbild. Die meisten Ansätze für neue Theorien, Wechselwirkungen oder Teilchen führen als Konsequenz zu einer Verletzung von Einsteins Äquivalenzprinzip [1]. Daher bieten sich zur experimentellen Überprüfung präzise Messungen an, beispielsweise der Äquivalenz des freien Falls für verschiedenartige Teilchen.

Die STE-QUEST-Initiative (Space Time Explorer and Quantum Equivalence Space Test) kam zu dem Ergebnis, dass sich Atominterferometer im Weltraum eignen würden, um das Äquivalenzprinzip äußerst präzise zu testen [2]. Diese Interferometer benutzen Atome als „ideale“ Testteilchen, die naturgegeben keine Fertigungstoleranzen aufweisen und sich mit Hilfe von Laserpulsen präzise manipulieren lassen. Gleichzeitig eröffnen die Quanteneigenschaften der Atome neue Testmöglichkeiten an der Grenze zwischen Quantenmechanik und Gravitation.

Beim Versuchsablauf in einem Atominterferometer wird zunächst mit Laser- und anderen Kühlmethode in einer Vakuumkammer eine ultrakalte gasförmige Atomwolke präpariert (Abb. 1). In dieser bewegen sich die Atome so langsam, dass sie über möglichst lange Zeit im freien



Auf diesem Atomchip erfolgten die Experimente am BEC im Weltall.

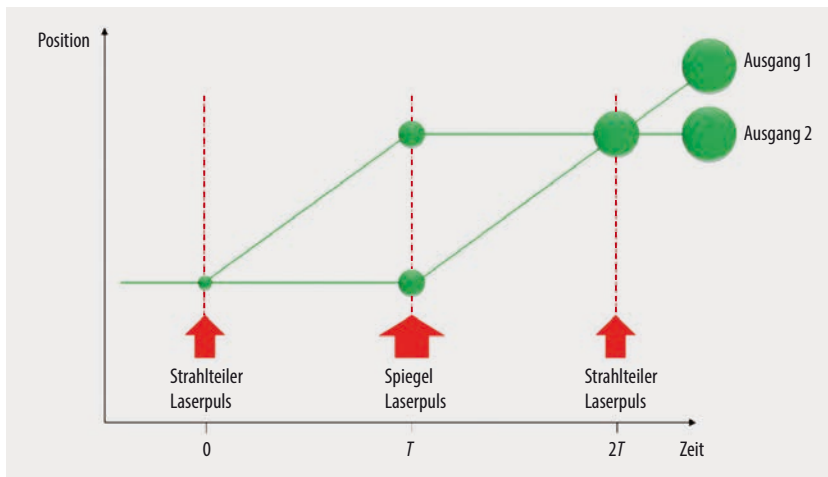
Fall zu beobachten sind. Die Atome werden dann einer Sequenz von meist drei, um die Zeit  $T$  zeitlich getrennten Laserpulsen ausgesetzt. Diese sind so bemessen, dass die Atome mit 50 % (1. Puls), 100 % (2. Puls) und 50 % (3. Puls) Wahrscheinlichkeit ein Photonpaar absorbieren bzw. stimuliert abgeben. Mit der Absorption überträgt sich gleichzeitig der Photonenimpuls auf die Atome, sodass diese im ersten Puls in eine Superposition von zwei Impulszuständen gelangen, die sich räumlich voneinander wegbewegen. Dieser Laserpuls agiert somit als Strahlteiler für die atomaren Materiewellen. Der zweite Puls invertiert die Impulszustände der Atome und agiert somit als „Spiegel“, der die atomaren Wellenpakete wieder aufeinander zubewegt. Wenn die atomaren Wellenpakete wieder überlappen, mischt der dritte Puls sie wie in einem Strahlteiler, sodass sie interferieren. Dadurch hängt die Anzahl der Atome in den jeweiligen Ausgangs-Impulszuständen

von der relativen Phasenentwicklung der Wellenpakete über die verschiedenen Trajektorien ab.

Bei dieser Methode stellt sich ein Phasenunterschied ein, der von der Beschleunigung des Systems abhängt und sich zum Test des Äquivalenzprinzips eignet. Dazu betreibt man das Atominterferometer zum Beispiel gleichzeitig mit zwei verschiedenen atomaren Spezies. Der Phasenunterschied wächst mit der Zeit, den die Atome auf den unterschiedlichen Trajektorien verbringen und mit dem Abstand der beiden Trajektorien, sodass er quadratisch mit der Zeit  $T$  zwischen den Interferometer-Pulsen wächst. Für höchste Präzision gilt es somit, die Interferometerzeit zu maximieren.

In typischen Laborapparaturen sind die Interferometerzeiten durch die verfügbare Fallstrecke auf wenige 100 ms begrenzt. Im Weltraum entfällt diese Beschränkung, was den Weg eröffnet zu einer um viele Größenordnungen höheren Präzision. Da nun die Expansion der Atomwolke die Interferometerzeit begrenzt, ist es für die hochpräzise Messung erforderlich, eine sehr viel kältere Atomquelle in einer vollständig autonomen und reproduzierbaren Apparatur zu realisieren. Diese muss zudem die Vibrationen und Temperaturschwankungen eines Raketenstarts überstehen.

Nun hat eine von Ernst Rasel an der Leibniz Universität Hannover geleitete Kollaboration genau diesen Meilenstein erzielt [3]. Das Forscherteam sendete am 23. Januar 2017 das Experiment MAIUS 1 (Materiewellen-Interferometrie unter Schwerelosigkeit) mit Hilfe des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ins All und demonstrierte erstmals die



**Abb. 1** In einem Atominterferometer wird die Atomwolke (grüner Kreis) durch drei Laserpulse (rot) wie in einem Mach-Zehnder-Interferometer manipuliert. Im Weltraum ist die thermische Ausdehnung – dargestellt durch größer werdende Kreise – die wesentliche Hürde auf dem Weg zu immer besseren Messungen.

Möglichkeit, ein Probeteilchenensemble für die Atominterferometrie unter Weltraumbedingungen zu erzeugen (**Abb. 2**). Dabei gelang es den Forschern, Bose-Einstein-Kondensate als ultrakalte Teilchenquelle sowie Atomstrahlteiler zu demonstrieren und ausführlich zu analysieren, z. B. in Bezug auf Kondensationstemperatur und Teilchenzahl. Dies bestätigte die Funktionsfähigkeit der Apparatur und zeigte sogar Verbesserungen der Teilchenzahl unter Schwerelosigkeit.

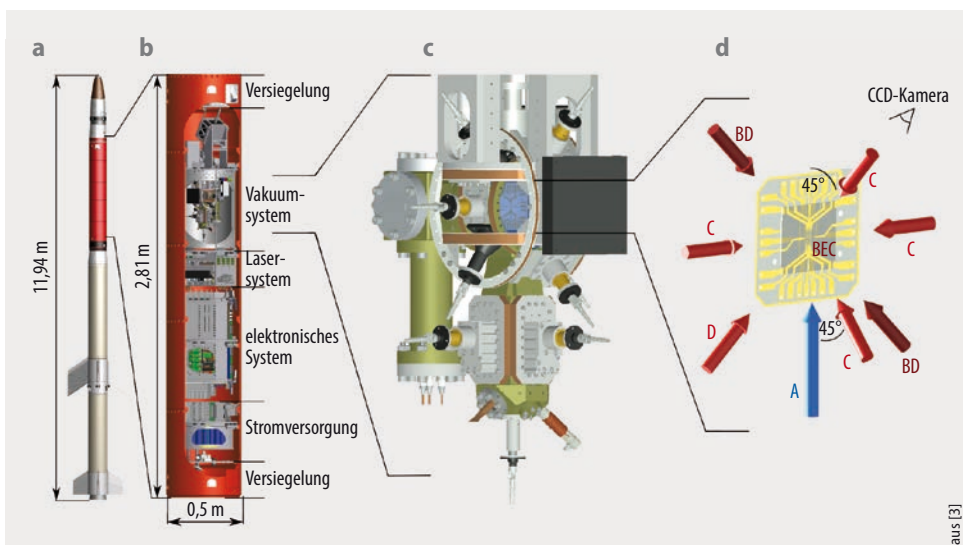
Die Forscher hatten zuvor bereits Bose-Einstein-Kondensate mit dem bislang höchsten Atomfluss [4] und

Ausdehnungsgeschwindigkeiten, die Rekord-Temperaturen von 50 Piko-kelvin entsprechen, erzielt und konnten nun die Funktionalität der entsprechenden Techniken auch im Weltraum nachweisen. Hierzu erzeugten sie ein Bose-Einstein-Kondensat, dessen interne Wechselwirkungsenergie sich durch eine Sequenz aus Expansion der Falle, freier Ausdehnung und einem Potentialpuls um mehrere Größenordnungen reduzierte. Um die Präparationszeit des Ensembles für die atominterferometrischen Messungen zu minimieren, wird dabei statt einer lang-

samen adiabatischen Transformation eine sehr viel schnellere Sequenz von ausgefeilten Potentialverformungen angewandt [5]. Da aus begrifflichen Gründen keine Doktoranden mitfliegen, welche die Apparatur wie in erdgebundenen Experimenten kontinuierlich optimieren könnten, muss jedes Detail der Apparatur vollständig verstanden und in Simulationen zur in-flight-Optimierung eingebettet sein.

In der aktuellen Arbeit ist es gelungen, dieses herausragende Verständnis aller Technologieparameter nachzuweisen und in einer ganzheitlichen Simulation des Atomchipexperiments einzubinden. Die erzielbaren Temperaturen erlauben eine Messzeit im Interferometer über mehrere 10 Sekunden und somit eine mehr als 1000-Mal höhere Empfindlichkeit gegenüber erdgebundenen Messungen. Damit ebnete das Experiment den Weg für zukünftige Weltraummissionen auf der Jagd nach Neuer Physik.

Wir dürfen nun mit Spannung die nächsten Weltraum-Experimente dieser DLR-Kollaboration erwarten, die in weiteren Raketenflügen die nächsten Schritte zur höchstpräzisen Interferometrie mit mehreren unterschiedlichen Atomspezies vorantreiben möchte. Vielleicht werden uns die Resultate schon bald in Richtung eines neuen Weltbildes leiten, das die Physik auf die nächste Stufe hebt.



**Abb. 2** Die Rakete (a) trug die Nutzlast (b) mit dem Vakuumsystem (c), das den Atomchip (d) enthält, in den Weltraum. Auf dem Atomchip wird eine magneto-optische Falle, die durch Laserstrahlen (C) gebildet wird, aus dem Strahl kalter Atome geladen (A). Anschließend wird das BEC in die Magnetfalle des Atomchips eingebracht, transportiert und wieder freigegeben. Zwei zusätzliche Lichtstrahlen (BD) induzieren die Bragg-Beugung, und eine CCD-Kamera zeichnet das Absorptionsbild des BEC mittels Laserlicht (D) auf.

- [1] D. Aguilera et al., *Classical and Quantum Gravity* 31, 115010 (2014)
- [2] B. Altschul et al., *Advances in Space Research* 55, 501 (2015)
- [3] D. Becker et al., *Nature* 395, 391 (2018)
- [4] J. Rudolph et al., *New Journal of Physics* 17, 065001 (2015)
- [5] R. Corgier et al., *New Journal of Physics* 20, 055002 (2018)

## Autor

**Prof. Dr. Kai Bongs**, School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, Großbritannien