Forschung im Fallturm

Am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation in Bremen finden seit mehr als 30 Jahren Experimente in Schwerelosigkeit statt.

Maike Pfalz

Alle Fotos: ZARM / Universität Bremen

Schon bei der Anfahrt über die Autobahn A27 ist er von Weitem sichtbar – der fast 150 Meter hohe Fallturm des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen. Von der Abfahrt Horn-Lehe dauert es nur wenige Minuten, bis ich mein Auto vor dem imposanten Bauwerk, das im ansonsten flachen Bremer Umland alles überragt, parken kann. Der Fallturm ist zu einem Wahrzeichen für die Stadt Bremen geworden, um das herum sich ein ganzer Stadtteil angesiedelt hat, der zu einem großen Teil der Wissenschaft gewidmet ist. Hier finden sich Universitätsinstitute, das große Werk des Raumfahrtunternehmens OHB-System, Start-up-Firmen, das Science Center Universum Bremen oder auch das DLR-Institut für Weltraumsysteme.

Die Geschichte der Astronomie reicht in Bremen mehr als 200 Jahre zurück. Damals hatte Johann Schröter in Lilienthal bei Bremen das zu der Zeit größte Teleskop auf dem europäischen Kontinent gebaut und in Bremen die erste Astronomische Gesellschaft der Welt gegründet. „So entwickelte sich Bremen folgerichtig in jüngerer Vergangenheit zu einer Stadt der Raumfahrt“, betont Claus Lämmerzahl, Leiter für Weltraumwissenschaften am ZARM und Professor an der Universität Bremen.

Das ZARM wurde 1985 für Forschung unter Weltraumbedingungen sowie die Untersuchung weltraumrelevanter Fragestellungen gegründet. Die Forschenden dort widmen sich der Strömungsmechanik, den Weltraumwissenschaften und der Raumfahrttechnologie. Sie entwickeln Technologien für den Einsatz in Raketen und Satelliten und führen Experimente unter Schwerelosigkeit durch. Möglich macht dies der Fallturm, der 1990 seinen Betrieb aufgenommen hat. Innerhalb des Turms befindet sich eine 120 Meter hohe, evakuierte Fallröhre, die von windbedingten Schwankungen des Außenturms entkoppelt ist. Am ZARM arbeiten mehr als hundert Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Ingenieurinnen und Ingenieure, technisches und administratives Personal sowie Studierende der Ingenieur- und Naturwissenschaften.

Bei meinem Besuch Mitte Juni wird nicht nur der neue Fallturm „GraviTower Bremen Pro“ der Öffentlichkeit vorgestellt, sondern es finden auch zwei Katapultflüge im Fallturm statt. Heute sind Wissenschaftler vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln und von der Universität des Saarlandes hier, um das Verhalten von Nanopartikel-Suspensionen in Schwerelosigkeit zu untersuchen. Gemeinsam warten wir im Kontrollraum darauf, dass das Experiment starten kann. Ein solches besitzt einen vorgegebenen Durchmesser von 0,8 Metern und eine Höhe von entweder 1,6 oder 2,4 Metern, das maximale Gewicht beträgt etwa eine halbe Tonne. Vor dem Abwurf befindet es sich im Katapultsystem, in dem es 8,8 Meter in die Tiefe gezogen und dort zunächst hydraulisch festgehalten wird. Verschiedene Kameras in der Fallröhre zeigen auf der großen Leinwand im Kontrollraum neben dem Experi-

© 2022 Wiley-VCH GmbH

ment am Boden beispielsweise auch die Spitze des Fallturms oder den im Turm befindlichen Nistkasten, den regelmäßig Turm- oder Wanderfalken als Nistplatz nutzen.

Für die Flüge evakuieren 18 Pumpen den gesamten Fallraum und erreichen dabei ein Vakuum von 10^{-4} bar. Durch diesen geringen Restdruck erzielt der Fallturm eine hohe Qualität von Mikrogravitation, die mit einer Restbeschleunigung von 10^{-6} *g* besser ist als diejenige bemannter orbitaler Plattformen wie der Internationalen Raumstation ISS oder auch von Parabelflügen.

Während der Vorbereitung des Katapultabwurfs überwacht der Operator des ZARM, dass die Anlage fehlerfrei funktioniert. Mit einem grünen Knopf gibt er schließlich den Abflug frei. Auslösen müssen diesen allerdings die Experimentatoren selbst an ihren eigenen Laptops. „Das machen wir bewusst so, damit die Experimentatorinnen und Experimentatoren in Ruhe ihre Vorbereitungen abschließen und nicht hektisch auf den Countdown reagieren müssen", erläutert Claus Lämmerzahl.

Nach der Freigabe des Fluges – übrigens ganz ohne Countdown – geht alles ganz schnell: Innerhalb von nur 0,25 Sekunden beschleunigt das Katapultsystem die Experimentierkapsel mit etwa dem Zwanzigfachen der Erdbeschleunigung auf eine Geschwindigkeit von 168 km/h, mit der sie rund 120 Meter hoch fliegt, um dann wieder gen Boden zu fallen. Während der gesamten Steig- und Fallzeit herrscht in der Experimentierkapsel Schwerelosigkeit. Nach 9,3 Sekunden trifft sie unten in den acht Meter hohen Auffangbehälter, den stecknadelkopfgroße Polystyrolkugeln komplett ausfüllen. Experimente, welche die hohe Anfangsbeschleunigung nicht vertragen, können auch aus der Spitze des Turms starten – das halbiert allerdings die Zeit in der Schwerelosigkeit auf 4,74 Sekunden. Bevor die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihr Experiment aus dem Auffangbehälter bergen können, strömt vorgetrocknete Luft in den Fallturm und gleicht das Vakuum aus.

In die Spitze katapultieren

Maximal drei Abwürfe sind pro Tag im Fallturm möglich, seit 2004 unter Nutzung des Katapultsystems. Die Experimente reichen von Astrophysik, Biologie, Chemie, Verbrennungsforschung, Strömungsmechanik, Materialwissenschaften bis hin zu Fundamentalphysik. Die Wissenschaftler aus Köln und Saarbrücken möchten zum Beispiel herausfinden, welche Strukturen die Nanopartikel in der Suspension bilden. Ziel dabei ist es, das Experiment auf eine Höhenforschungsrakete zu bringen, wo es sich rund sechs Minuten in Schwerelosigkeit befindet – erst dann sind die gewünschten Strukturbildungsphänomene sichtbar. Am Fallturm gilt es, vorab das System zu testen; die kurze Dauer der Mikrogravitation reicht nicht aus, um die Strukturbildung zu sehen.

Wie diffizil diese Experimente sind, zeigt sich auch an diesem Tag: „Die Dosiereinheit in unserem System hat die Probe erst gar nicht bereitgestellt, und wir wissen nicht warum. Am Boden hat das immer funktioniert", erläutert der verantwortliche Wissenschaftler.

Für ein anderes Experiment gibt es deutlich mehr Erfahrungswerte: „Quantus: Ultracold Macroscopic Quantum Systems in Weightlessness" hat in den letzten 20 Jahren bereits rund tausend Abwürfe absolviert. Quantus-1 ist die erste im Fallturm betriebene BEC-Apparatur.[1] Ziel des Projekts ist es, das Gravitationsfeld beziehungsweise seine kleinsten Änderungen präzise zu vermessen.

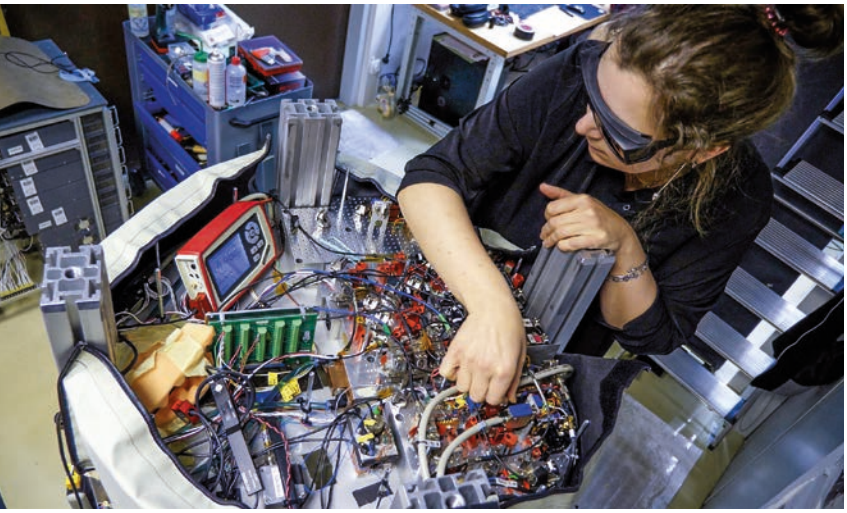
Im Jahr 1924 sagte Albert Einstein auf Basis einer Arbeit von Satyendranath Bose vorher, dass ein homogenes ideales Bose-Gas bei tiefen Temperaturen kondensiert. 1995 gelang es Eric Cornell und Carl Wieman sowie unabhängig davon Wolfgang Ketterle, das erste Bose-Einstein-Kondensat (BEC) zu realisieren. In diesem „vierten Aggregatzustand" besetzen tausende neutrale Atome dieselbe quantenmechanische Wellenfunktion mit der gleichen Phase – ähnlich dem Lichtfeld in einem Laser. BECs sind vielversprechende Kandidaten, um Quantentechnologien zu realisieren. Ein Beispiel sind Quantensensoren, die Anwendungen von der Geodäsie über die Metrologie bis hin zu fundamentalen Fragen wie Tests des Äquivalenzprinzips besitzen.

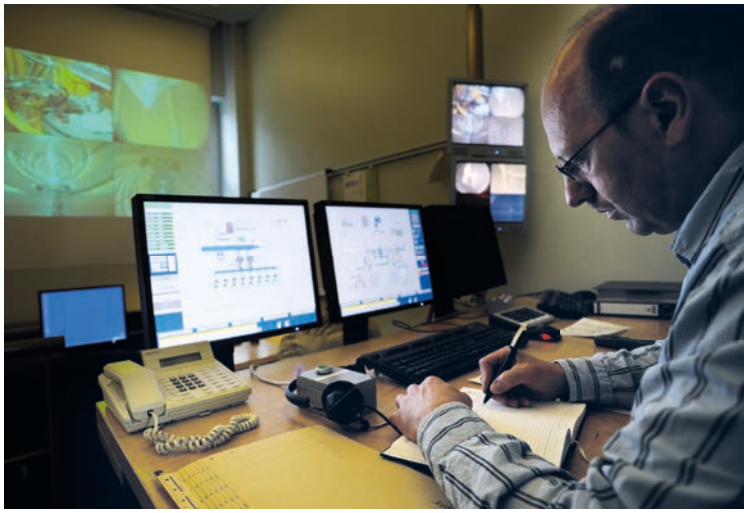
Die Mikrogravitation bietet zur Untersuchung von BECs ein unvergleichliches Regime kältester Temperaturen, makroskopischer Dimensionen der Materiewellen und der längsten freien Entwicklung des Kondensats auf einer Zeitskala von Sekunden. Die Empfindlichkeit von Quantensensoren auf Basis frei fallender Atome nimmt mit dem Quadrat der Flugzeit der Atome zu. „Auf der Erde fällt jeder Gegenstand nach etwa einer Zehntelsekunde auf den Boden, im Fallturm erhöht sich diese Fallzeit nahezu um den Faktor 50 oder 100", verdeutlicht Claus Lämmerzahl. Das macht die Sensoren um bis zu vier Größenordnungen empfindlicher.

Im Inneren des Fallturms wird eine Experimentierkapsel (rechts) hochgezogen. Links daneben befindet sich der fast neun Meter hohe Auffangbehälter, in den die Kapsel nach dem Abwurf hineinfällt.

1) Zu den Hintergründen siehe beispielsweise: *M. Arndt*, Physik Journal, Mai 2013, S. 20 und *Th. Schumm* und *J. Schmiedmayer*, Physik Journal, Januar 2009, S. 23

© 2022 Wiley-VCH GmbH





Merle Cornelius (links) justiert den Laser des Experiments Quantus-2, an dem sie bereits ihre Promotion angefertigt hat. Bei den Abwürfen oder Katapultflügen stellt der Operator des ZARM (rechts) sicher, dass alle Systeme des Fallturms einwandfrei funktionieren. Sobald alles vorbereitet ist, drückt er den grünen Knopf und gibt damit den Abwurf frei.

Bei Quantus wird zunächst eine magneto-optische Falle auf einem Atomchip mit einem kalten Ensemble von Rubidium-Atomen beladen. Während des Abwurfs im Fallturm werden die lasergekühlten Atome in eine Magnetfalle umgeladen, in der durch Verdampfungskühlung das BEC entsteht. „Ein paar Jahre hat es gedauert, bis wir überhaupt im freien Fall das erste BEC realisieren konnten", erzählt Claus Lämmerzahl. Die Schwierigkeit bestand darin herauszufinden, mit welchen Parametern die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die heißen Atome aus der magneto-optischen Falle (MOT) entlassen müssen, damit die kalten übrig bleiben und sich überhaupt ein BEC einstellen kann. Im nächsten Schritt haben sie dieses aufgeteilt und beide Teile anschließend wieder überlappen lassen, um Interferenzen zu beobachten. Ein solches Atominterferometer zählt heutzutage zu den besten Präzisionsinstrumenten. Inzwischen läuft das Experiment so stabil, dass es nach einem Abwurf nicht notwendig ist, die optischen Komponenten neu zu justieren, um nochmals ein BEC zu erzeugen.

In der Integrationshalle bereiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihr Experiment auf den Flug im Fallturm vor.

Da die Messempfindlichkeit eines Atominterferometers mit der Fläche zwischen den aufgefächerten Teilarmen wächst, versuchen die Forschenden bei Quantus, diese zu erhöhen. Dies gelingt über den gezielten Impulsübertrag auf die Atome durch diejenigen Laserpulse, welche die Entwicklung der atomaren Wellenfunktion kontrollieren. Allerdings dünnen sich dabei die beiden BEC-Teile aus. „Hier kommt ein Trick ins Spiel: Durch sogenanntes δ-kick Cooling konnten wir die BEC-Wolke so weit verlangsamen, dass sie eine Temperatur von 35 Pikokelvin erreichte", erläutert Merle Cornelius, die diesen Kälterekord in ihrer Doktorarbeit realisiert hat. Zugrunde liegt diesem Temperaturbegriff die kinetische Energie der Atome.

Experiment im Ruhestand

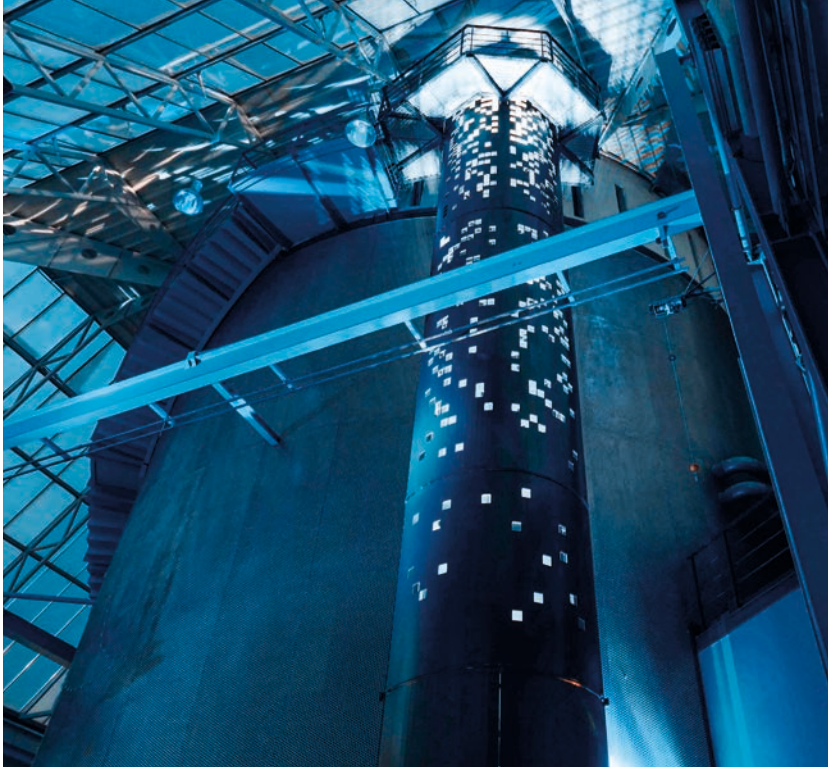
Nach etwa 600 Flügen wurde das Experiment Quantus-1 in den Ruhestand versetzt – es dient nun am Boden dazu, neue Technologien zu entwickeln und zu testen. Im Labor kann ich noch die offene Experimentierkapsel sehen, in der schon Komponenten fehlen. Größere Unfälle bei den Abwürfen gab es mit Quantus-1 nur zwei: Einmal war eine Schraube nicht richtig angezogen, was für einen Kurzschluss im Atomchip gesorgt hat. „Das ist das Herzstück des Experiments. Als das kaputt gegangen ist, hat uns das ein, zwei Jahre zurückgeworfen", erinnert sich Claus Lämmerzahl. Inzwischen hat auch das Nachfolgeexperiment Quantus-2, das zunächst an der Universität Hannover aufgebaut wurde und 2012 nach Bremen umzog, fast 400 Abwürfe absolviert. Und die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben aus den Erfahrungen von Quantus-1 gelernt: „Inzwischen ist eine Chipsicherung verbaut, nämlich zwei Platinen, die

© 2022 Wiley-VCH GmbH

den Strom durch den Chip begrenzen und einen erneuten Kurzschluss verhindern", sagt Merle Cornelius.

Quantus-2 ist rund 150 kg leichter als sein Vorgänger und wiegt noch 450 kg. Das Experiment ist zudem deutlich kompakter, die meisten Komponenten sind selbst entwickelt. Wie viel kleinteiliger die einzelnen Bauteile sind, offenbart sich selbst mir auf den ersten Blick. „Hier sind schon mehrere Generationen an Promovierenden durchgelaufen, und jede hat einen wichtigen Teil hinzugefügt", betont Merle Cornelius. In Quantus-2 nutzen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Doppel-MOT-System, bei dem die erste MOT den Atomstrahl vorkühlt, um deutlich schneller ein BEC zu erzeugen – in weniger als einer Sekunde. Derzeit befindet sich ein optisches System mit Rubidium in der Kapsel. Geplant ist, dieses um ein zweites System mit Kaliumatomen zu ergänzen. „Dann wird es sehr eng in der Kapsel", lacht Merle Cornelius.

Nach längeren Umbauphasen wartet auf das Experiment eine zwei- bis dreiwöchige Messkampagne. „Es ist für uns jedes Mal wieder spannend, unsere Kapsel aus dem Auffangbehälter zu bergen und zu sehen, ob alles geklappt hat, speziell nach größeren Umbauten", gibt Merle Cornelius zu.



Der neue GraviTower Bremen Pro ermöglicht täglich fast tausend Experimente in Schwerelosigkeit.

Schwerelos auf Schienen

Künftig werden solche Messkampagnen für die Mitarbeitenden des ZARM deutlich komfortabler vonstattengehen, und vor allem mit viel mehr Flügen: Denn anstelle der drei Flüge im großen Fallturm erlaubt der neue GraviTower Bremen Pro fast tausend Wiederholungen am Tag. Er ist nur 16 Meter hoch und direkt am bestehenden Fallturm installiert. Die Experimente befinden sich darin für 2,5 Sekunden in Mikrogravitation, bei derzeit 10^{-4} *g*. Aber Ziel ist die gleiche Qualität an Mikrogravitation wie im großen Turm. Schon Ende letzten Jahres fanden die ersten Experimente darin statt, aber Mitte Juni darf ich die erste öffentliche Präsentation bei der feierlichen Einweihung miterleben.

Der neue Fallturm erfordert kein Vakuum, stattdessen kommt ein innovatives Schienensystem zum Einsatz: Ein Seilantrieb beschleunigt den Schlitten als Träger der Experimentierkapsel auf genau die Geschwindigkeit, die er während eines Katapultfluges im Vakuum des großen Fallturms erreichen würde. Dies kompensiert den störenden Luftwiderstand. „Die Herausforderung bestand darin, das Experiment mechanisch vom Schlitten zu trennen, damit Störungen des Antriebs, des Schienensystems und des Schlittens dieses nicht stören. Dafür haben wir spezielle Entkopplungsmechanismen entwickelt", erläutert Projektleiter Andreas Gierse. Während der Schwerelosigkeitsphase ist das Experiment komplett vom Schlitten entkoppelt und befindet sich berührungslos im freien Fall. Am Ende bremst der Seilantrieb Schlitten und Experiment wieder ab. Von außen kann ich diesen Vorgang ganz leise hören – hier ist man als Besucherin oder Wissenschaftler im Gegensatz zum großen Turm „hautnah" und nicht nur über das diffuse Kamerabild auf der großen Leinwand dabei.

Die Anlage läuft vollautomatisiert und ist dadurch leicht zu bedienen. Eine fertige Sequenz gibt vor, ob das Experiment zwischen den Flügen geheizt, gekühlt oder mit Strom versorgt werden muss. Vorab lassen sich verschiedene Parabeln mit unterschiedlichen Beschleunigungen einstellen, um verschiedene Einstellungen vollautomatisiert durchzufahren. Für einen Probenwechsel zwischen den Flügen lässt sich am Turm die Tür öffnen und das Experiment frei drehen, damit die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler überall heran kommen. Das ermöglicht einen Betrieb rund um die Uhr.

Der GraviTower ist vollwertig wissenschaftlich nutzbar, dient gleichzeitig aber auch als Technologieträger, um zu prüfen, ob seine Technik skalierbar ist für größere Falltürme. Derzeit holen die Projektbeteiligten beispielsweise Boden- und Windgutachten ein für einen größeren Turm mit aktivem Antrieb, die Vorstudien dafür laufen bereits. Um acht Sekunden Schwerelosigkeit zu erreichen, würde der Turm die gleiche Höhe haben wie der große Fallturm, allerdings müsste er 60 Meter in die Tiefe reichen und auf einem 17 Meter durchmessenden Fundament auf 50 meterhohen Phählen stehen.

Zusammen bieten der große Fallturm am ZARM und der neue GraviTower ein europaweit einzigartiges Forschungslabor für Kurzzeitexperimente unter Bedingungen der Schwerelosigkeit. Die hohe Qualität der Mikrogravitation und die hervorragende Reproduzierbarkeit der Experimentierumgebung machen die Anlagen begehrt und lassen den Bedarf für Fallturmexperimente stetig ansteigen. Gruppen aus aller Welt und aus den verschiedensten Fachgebieten nutzen die Infrastruktur am ZARM – künftig an zwei Türmen für bis zu tausend Experimente an jedem Tag.

Während die Mitarbeitenden des ZARM und die geladenen Gäste noch die Einweihung des neuen Fallturms feiern, mache ich mich wieder auf den Heimweg – im Rückspiegel verfolgt mich dabei der Blick auf den fast 150 Meter hohen Fallturm noch eine ganze Weile.

© 2022 Wiley-VCH GmbH