

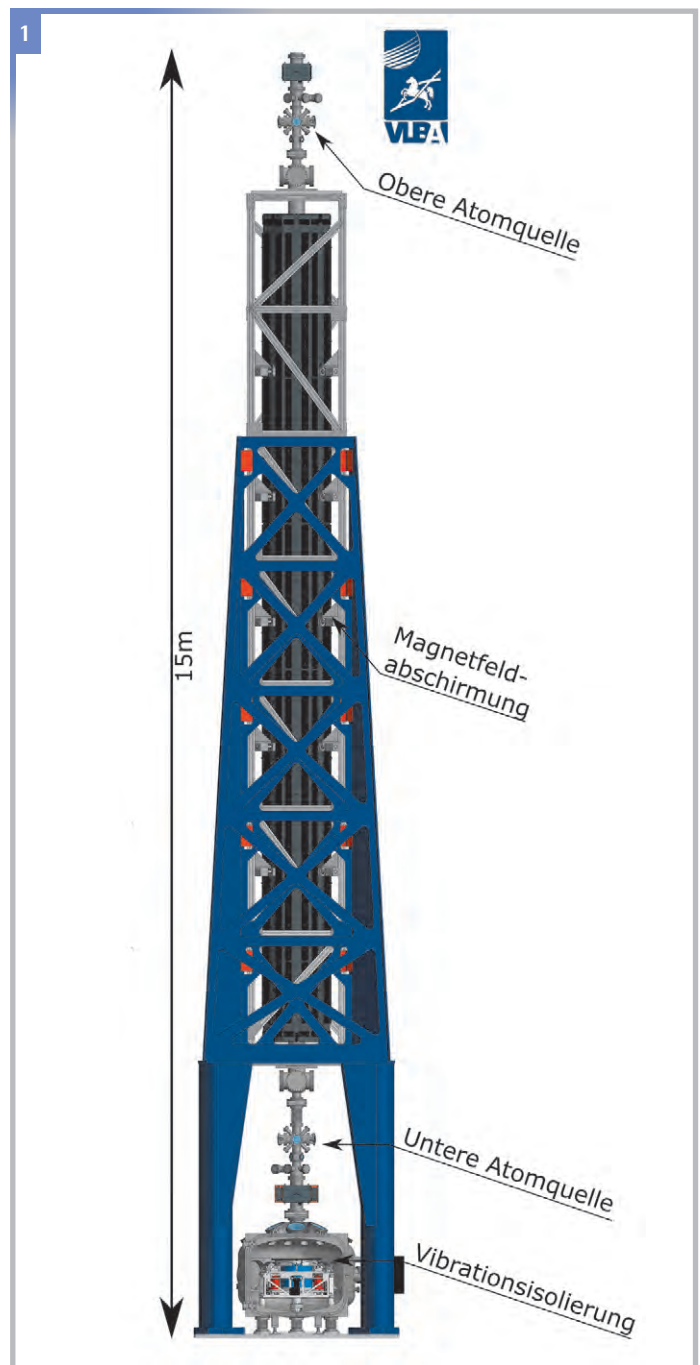
Der VLBAI-Teststand

EIN FALLTURM FÜR ATOME

Der Very Long Baseline Atom Interferometer-Teststand (VLBAI) ist eine multifunktional einsetzbare Experimentplattform für atominterferometrische Inertialsensorik zur Geodäsie und Grundlagenforschung in der Physik. Es ist eines der drei zentralen Großgeräte im Forschungsbau HITEC. Drei Wissenschaftler vom Institut für Quantenoptik berichten.

Die Frage, wie weit man ein Atom von sich selbst trennen kann, ist vielleicht eine der faszinierendsten in der modernen Physik. Eine solche Trennung mittels quantenmechanischer Delokalisierung eines Materiewellenpakets – das Atom, beschrieben durch eine quantenmechanische Wellenfunktion, befindet sich dann bis zur Detektion tatsächlich gleichzeitig an zwei verschiedenen Orten – ist nicht nur für fundamentale Fragestellungen in der Quantenmechanik interessant, sondern eröffnet auch die Tür zu neuen Empfindlichkeitsrekorden.

Vermisst man interferometrisch – also mit Messmethoden, die die Überlagerung von Wellen nutzen, um zu messende Größen zu bestimmen – mit frei fallenden Materiewellen Beschleunigungen wie zum Beispiel die Anziehung der Erde, so wird die Messung umso empfindlicher, je länger die Materiewellen fallen. Ebenso führt eine große Delokalisation der Materiewellen während der Messung zu höheren Empfindlichkeiten, ähnlich wie durch die Verwendung eines Meterstabs mit feinerer Unterteilung. Um hier die nächste Größenordnung an Empfindlichkeit zu erreichen und gleichzeitig die »Brücke« zwischen Bodenexperimenten und Apparaturen im Weltall, an Bord derer prinzipiell beliebig lange Freifallzeiten möglich sind, zu bauen, stellt

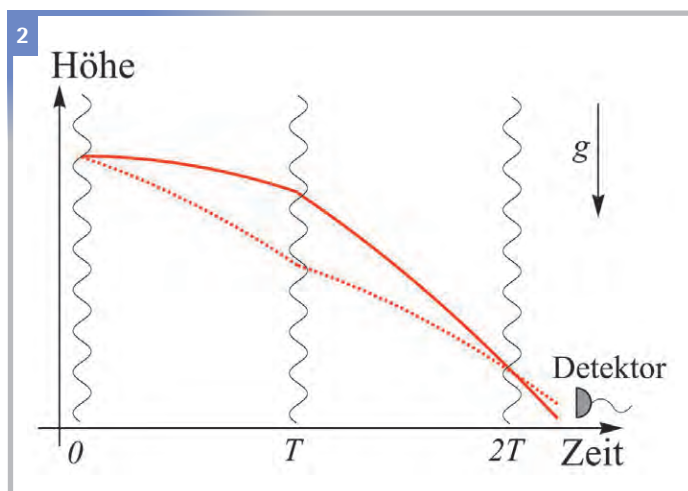


der *Very Long Baseline Atom Interferometer*-Teststand (VLBAI, siehe *Abbildung 1*) besonders viel Platz zur Verfügung: Als eines der drei zentralen Großgeräte im Forschungsbau HITec (nicht zu verwechseln mit dem separat stehenden Freifallsimulator »Einstein-Elevator«, in welchem nicht nur atomare Wellenpakete, sondern ganze experimentelle Apparaturen frei fallen können) erstreckt

schließlich überlagert werden: Interferenz findet statt. Dies bedeutet, dass abhängig von Phasenunterschieden zwischen den beiden Pfaden, zum Beispiel ausgelöst durch Beschleunigungen, am Interferometerausgang verschieden viele Atome gezählt werden. Durch dieses Signal kann dann auf die zu vermessende Größe, im Beispiel die wirkende Beschleunigung, Rückschluss gezogen werden.

Spezies Rubidium und/oder Ytterbium bereitgestellt. Diese Testmassen können dann entweder fallen gelassen oder auf eine Wurfparabel gebracht werden, um im freien Fall den Messzyklus zu durchlaufen.

- Die Interferometriezone ist das Herzstück des Teststands. Um in der über 10 Meter langen Vakuumröhre Messungen durchzuführen, muss diese bestmöglich vor äußeren Störeinflüssen geschützt werden. Neben der Erzeugung von Ultrahochvakuum innerhalb der Röhre – hier herrschen bis zu tausendfach niedrigere Drücke als beispielsweise im nahen Erdborbit – spielt hier insbesondere eine komplexe Konstruktion aus Aluminium und speziellen Eisen-Nickel-Blechen (»Mu-Metall«) eine wichtige Rolle: Die in Zusammenarbeit mit Prof. Peter Fierlinger der Technischen Universität München konzipierte Magnetfeldabschirmung eröffnet eine neue Ära im Bereich der Magnetfeldkontrolle in Materiewelleninterferometern. Zwei Lagen Mu-Metall erzeugen durch geschickte Anordnung die Ablenkung von magnetischen Feldlinien weg von der Interferometriezone.



sich das 15 Meter lange Fallröhrenvakuumsystem über drei Stockwerke durch einen Schacht vom Keller bis über das Dach hinaus.

In voller Analogie zu optischen Interferometern, wie sie beispielsweise kürzlich zum spektakulären direkten Nachweis von Gravitationswellen verwendet wurden, basieren auch Materiewelleninterferometer auf Geometrien, die mithilfe von Strahlteilern und Spiegeln realisiert werden. Im Gegensatz zu optischen Interferometern tauschen hier allerdings Materie und Licht die Rollen: Strahlteiler und Spiegel werden durch Laserstrahlen realisiert und erzeugen Materiewellenüberlagerungen, die gleichzeitig auf zwei räumlich getrennte Pfade gelenkt werden (*Abbildung 2*). Nach Umlenkung können die Pfade an-

Im Rennen mit den zwei anderen Atominterferometern dieser Dimension in Wuhan (China) und Stanford (USA) ist der VLBAI-Teststand mit allerlei technischen Raffinesen gespickt, welche in Zukunft herausragende Experimente erhoffen lassen. Die Apparatur (*Abbildung 1*) lässt sich in drei Kernkomponenten unterteilen:

- Die Quellen für ultrakalte Atome sind der Ausgangspunkt für sämtliche Experimente im Teststand. Mithilfe sehr gut erforschter Techniken aus dem Bereich der Laserkühlung und der Erzeugung ultrakalter Quantengase bis hin zur Bose-Einstein-Kondensation – dem Materiependant zum Laser – werden an beiden Enden der Interferometriezone etwa einmal pro Sekunde Ensembles der
- Den Referenzpunkt und damit die Basis aller Experimente stellt die seismische Isolierung des Teststands dar. Hier werden Methoden aus dem Feld der experimentellen Gravitationswellenphysik verwendet: Mittels einer geschickten Anordnung spezieller Blattfedern aus künstlich gealtertem Stahl wird eine besonders hohe Periodendauer der Eigenschwingung des Isolators von einigen Sekunden pro Schwingung erzeugt.

Störeinflüsse oberhalb der Eigenfrequenz werden dadurch natürlicherweise unterdrückt. Um auch die mechanische Resonanz sowie tieferfrequente Störeinflüsse zu unterbinden, befinden sich auf der Plattform mehrere Seismometer. Mit ihrer Hilfe werden Restbewegungen und Rotationen präzise erfasst und anschließend mittels von elektromagnetischer Aktuatoren gekontrolliert.

Mithilfe des neuen VLBAI-Teststands wird es möglich sein, eine Vielzahl faszinierender Experimente sowohl im Bereich praktischer Anwendungen als auch in der Geodäsie, mit hoher Bedeutung für die Grundpfeiler der fundamentalen Physik durchzuführen.

So wäre es zum Beispiel für Geodäten eine Revolution, Messungen der Erdbeschleunigungen mit erhöhter Genauigkeit und stabil über sehr lange Zeitintervalle durchzuführen. Prinzipiell stünde dann neuem Verständnis von hydrologischen Modellen, welche in Küstenregionen aufgrund

von Unterwanderung des Grundwasserspiegels durch Salzwasser von hoher Bedeutung für den Menschen sind, nichts mehr im Wege. Mit großen Netzwerken vieler VLBAI-ähnlicher Instrumente auf der Erde können neue Erkenntnisse über die elastischen Schwingungseigenschaften der Erde und gar neue Möglichkeiten zur Erdbebenvorwarnung gewonnen werden.

Auch auf der fundamentalen Seite stehen spannende Tests bevor. Gegenstand aktueller Forschung ist der Übergang zwischen dem Mikrokosmos, in dem die Quantenmechanik dominiert und der makroskopischen Realität, wie sie unser tägliches Leben bestimmt. Da die Empfindlichkeit des Apparats auf der räumlichen Separation von Überlagerungszuständen basiert, eignen diese sich hervorragend zur Überprüfung eventuell existierender Grenzen dieser makroskopischen Ausdehnung von quantenmechanischen Zuständen. Weiterhin basiert unser derzeitiges Verständnis der modernen Physik

vollständig auf zwei großen Theorien: der Quantenmechanik und der allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein. Da es bis heute aufgrund von Inkonsistenzen nicht gelungen ist, beide Theorien zu einer sogenannten »Weltformel« zu vereinen, suchen Wissenschaftler weltweit nach Verletzungen von bisher als gültig anerkannten Gesetzen.

Im VLBAI-Teststand soll ein ganz zentrale Postulat von Albert Einstein unter die Lupe genommen werden: Fallen alle Körper unabhängig von ihrer Masse und anderer Eigenschaften am selben Ort immer gleich schnell? Auf diese Frage liefert keine Theorie eine Antwort – nur experimentelle Überprüfungen können hier Licht ins Dunkel bringen. Im Spektrum von anschaulichen Tests dieser Universalität des freien Falls (UFF) wie dem Fall von Hammer und Feder auf der luftleeren Mondoberfläche während der Apollo 15 Mission bis hin zu hochempfindlichen Experimenten mit Torsionswaagen auf der Erde und mit speziellen Beschleunigungssensoren der Microscope Satellitenmission in 2017 konnte bisher keine Verletzung festgestellt werden. Durch den Vergleich des Freifalls von Ytterbium- und Rubidiumensibles im VLBAI-Teststand wird ein neues Kapitel im Feld der Quantentests der UFF aufgeschlagen. Auf der spannenden Suche nach neuer Physik ist hier also in Zukunft Vieles zu erwarten!



Prof. Dr. Ernst M. Rasel

Jahrgang 1965, ist Professor am Institut für Quantenoptik. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Atomoptik, Quantenoptik sowie Präzisionssensoren für Raum und Zeit. Kontakt: rasel@iqo.uni-hannover.de



Dr. Dennis Schlippert

Jahrgang 1985, ist Gruppenleiter am Institut für Quantenoptik. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Atominterferometrie mit langen Fallzeiten und der Erforschung neuartiger Sensorkonzepte für inertielle Messungen in dynamischen Umgebungen. Kontakt: schlippert@iqo.uni-hannover.de



Étienne Wodey

Jahrgang 1991, ist Doktorand am Institut für Quantenoptik. Der Schwerpunkt seiner Doktorarbeit liegt in der technischen Umsetzung der VLBAI-Atomfontäne und in der Erforschung neuer Atomquellen für Ytterbium. Kontakt: wodey@iqo.uni-hannover.de