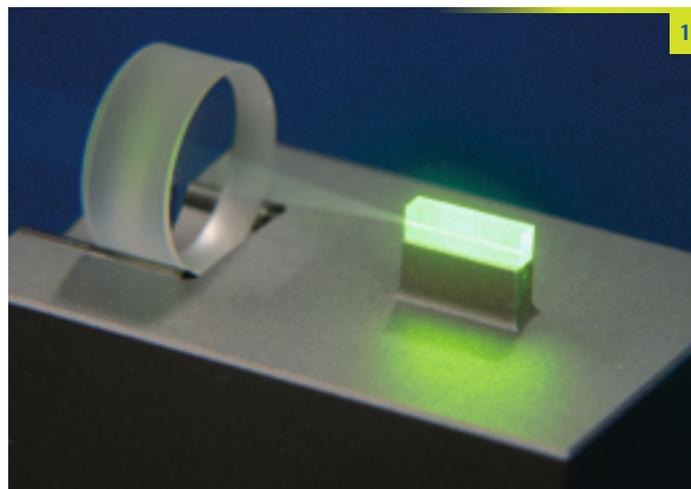


Quantenengineering

DIE PRÄZISION IM ALLERKLEINSTEN FÜR DIE PRÄZISION ÜBER ALLE DISTANZEN

Forschung am Quantenlimit, also an der Grenze dessen, was durch die gezielte Nutzung von Quanteneffekten erreichbar ist, ist ein zentrales Thema im Exzellenzcluster »Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research«, kurz QUEST, an der Leibniz Universität Hannover. Zwei Mitarbeiter des Exzellenzclusters erläutern, wie mithilfe modernster Messtechnologien die fundamentalen Gesetze der Physik untersucht, verstanden und genutzt werden sollen.



Quantenengineering lässt sich am besten als die gezielte Manipulation von Atomen und Molekülen auf der Quantenebene beschreiben. Manipulation auf der Quantenebene bedeutet, dass nicht das Forschungsobjekt an sich, sondern dessen Zustand und Interaktion in einem geschlossenen und kontrollierbaren System verändert beziehungsweise vorhersagbar gemacht werden. Dieses Forschungsfeld umfasst ein breites Spektrum an »konventionellen« Disziplinen der Physik, angefangen bei der Atom- und Molekülphysik über die Quantenoptik bis hin zur Festkörperphysik. QUEST verbindet hier experimentelle und theoretische Methoden, um damit neue Kontrollmechanismen für Quantensysteme zu schaffen und zu erforschen. Im Fo-

kus stehen dabei die Kombination von Quantensystemen aus stark korrelierten Atomen und Licht sowie die Wechselwirkung von nicht-klassischen Lichtfeldern mit atomaren Ensembles. Als besondere Herausforderung werden ergänzend verschränkte Quantenzustände aus Licht und massiven Testmassen studiert. Alle Experimente zum Quantenengineering haben aber eine gemeinsame Basis – die Manipulation innerer und äußerer atomarer Freiheitsgrade durch maßgeschneiderte Lasersysteme.

Der Laser hat also eine zentrale Funktion in diesem Gebiet und seine Bedeutung für das Quantenengineering lässt sich anhand aktueller Experimente besonders gut verdeutlichen. Erforscht werden beispiels-

weise besonders anspruchsvolle und stabile Lasersysteme oder transportable optische Atom-Uhren, bei denen der Laser die Funktion des klassischen Pendels als Taktgeber übernimmt. Weiterhin im Fokus stehen Gravitationswellendetektoren, neue Navigationssysteme und die Realisierung zukünftiger Satellitenmissionen, die wiederum sowohl fundamentalphysikalische Effekte testen als auch Erdbeobachtungen auf höchstem Niveau ermöglichen. Wir sprechen beim Quantenengineering also von der gezielten Nutzung von Quanteneffekten zur Entwicklung innovativer Technologien.

Der Laser als hochpräzises Messinstrument

Dank der enormen Fortschritte im Quantenengineering können heutzutage in der Laserinterferometrie, also bei der Abstandsmessung mithilfe von Lasern, Sensoren eingesetzt werden, die in der Lage sind, eine Längenänderung von dem Bruchteil eines Atomkerns zu registrieren. Solche hochpräzisen Messwerkzeuge, auch Quantensensoren genannt, finden zum Beispiel in der Detektion von Gravitationswellen oder in verschiedenen Erdmessverfahren Anwendung.

Ein besonders spannendes Beispiel aus diesem Forschungsbereich ist das Experiment GEO600. Hierbei handelt es sich um ein Laserinterferometer mit einer Länge von zwei Mal 600 Metern, die in einem rechten Winkel zueinander angeordnet sind.

Gravitationswellen, die bei astrophysikalischen Großereignissen wie beispielsweise bei der Kollision von Schwarzen Löchern oder Neutronen-

wurde nun erstmalig »gequetschtes Licht« in GEO600 eingebaut. Das Ziel ist es, das so genannte Schrotrauschen, welches in der Quantennatur des Lichts begründet ist, auf ein Minimum zu begrenzen. Mithilfe nicht-linearer optischer Kristalle lassen sich diese Vakuumfluktuationen so manipulieren (»quetschen«), dass ein erheblich reduziertes Rauschen gemessen wird. Lange Zeit galt es als zu aufwändig, gequetschtes Licht für

Strahlteilern für Materiewellen übernehmen. Präziser formuliert werden den Materiewellen im »Laserstrahlteiler« die räumliche und zeitliche Phase des Laserlichts aufgeprägt und sie werden räumlich aufgeteilt. Durch Variation der zeitlichen Phase des Lasers kann daher die Phasendifferenz der Teilstrahlen eingestellt werden, analog zum Verschieben eines Spiegels in einem Michelson-Interferometer, wie zum Beispiel GEO600.



Abbildung 1
Die Quetschlichtquelle: Ein Laser läuft durch einen Lithiumniobat-Kristall mit einer Länge von 6,5 Millimetern. Der zusätzliche Spiegel formt zusammen mit einer dielektrisch beschichteten Kristallfläche einen Resonator.
Foto: Albert-Einstein-Institut

Abbildung 2
Der Gravitationswellendetektor GEO600 in Ruthe bei Hannover: mit Laserlicht auf der Jagd nach Schwerkraftwellen
Foto: Albert-Einstein-Institut

sternen entstehen, lassen Raum und Zeit im gesamten Universum schwingen. Schon Albert Einstein hatte die Gravitationswellen in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt, es auf Grund der minimalen Auswirkungen auf Raum und Zeit aber für unmöglich gehalten, diese jemals direkt zu beobachten. Trifft aber eine solche Gravitationswelle auf GEO600, ändert sich die Laufzeit des Lasers in den Armen, so dass die Lichtleistung auf der Photodiode diese Veränderung wiedergeben kann. Die große Herausforderung besteht nun darin, die Empfindlichkeit des Detektors so zu steigern, dass die winzigen Signale, sie entsprechen einer relativen Änderung der Arme von weniger als 10^{-22} , zuverlässig aufgezeichnet werden können. Dafür

eine echte Anwendung verlässlich herzustellen. Dieser Umstand hat sich allerdings in den vergangenen Jahren geändert, nicht zuletzt durch federführende Forschungsarbeiten in QUEST.

Materiewellen ersetzen das Licht

Eine völlig neue Form von hochpräzisen Messgeräten wird derzeit in QUEST durch die gezielte Nutzung von Materiewellen untersucht. Bei der so genannten Atom-Interferometrie werden die Rollen von Licht und Materie im Vergleich zur oben beschriebenen optischen Interferometrie getauscht. Gemessen wird hier die Interferenz von Materiewellen, während Laserstrahlen die Aufgabe von Spiegeln und

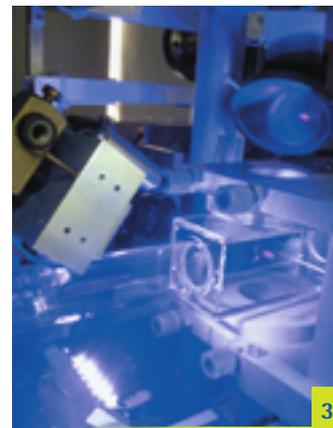


Abbildung 3
Ein Bose-Einstein-Kondensat aus zwei Milliarden Rubidium-Atomen (rot, in der Mitte der Glaszelle) ist in einer magneto-optischen Falle gefangen.
Foto: Oliver Topic

Besonders anschaulich demonstriert werden diese Arbeiten im Rahmen des Projektes QUANTUS (Quantengase unter Schwerelosigkeit), einem Kooperationsprojekt verschiedener Einrichtungen in Deutschland unter der Koordination des Instituts für Quan-

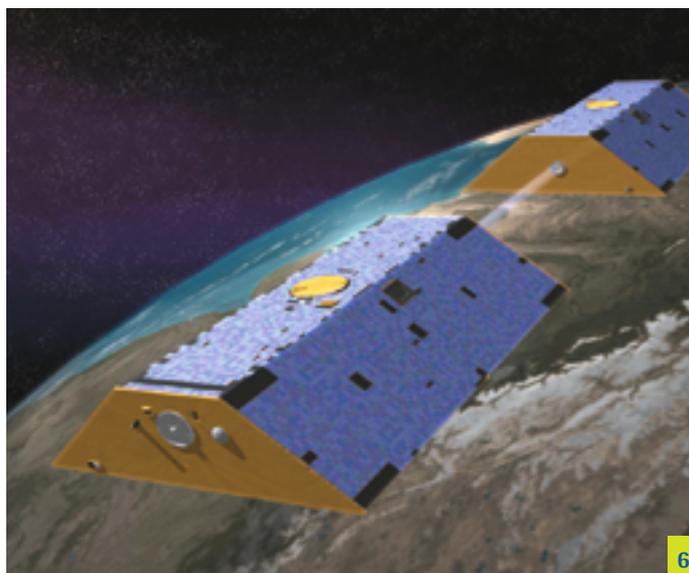
Abbildung 4
 Quantenengineering im freien Fall: Die Experimente in QUANTUS wurden im 146 Meter hohen Fallturm am Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen durchgeführt. Mit mehr als 180 Abwürfen ist es das komplexeste und zugleich stabilste Experiment, das bisher im Fallturm durchgeführt wurde.
 Foto: ZARM – Universität Bremen



Abbildung 5
 Aufbau einer optischen Atomuhr mit einem Yb⁺-Ion an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Dieses System ermöglicht eine sehr empfindliche Suche nach einer Zeitabhängigkeit der Feinstrukturkonstante.
 Foto: PTB Braunschweig



Abbildung 6
 GRACE – die beiden Satelliten schweben in geringer Entfernung hintereinander über die Erde. Ihre Distanz wird über Mikrowellen registriert und aus den Messwerten errechnet, welchen Einfluss das Erdschwerefeld auf beide Satelliten hat. In Zukunft sollen Laser die Distanzmessung übernehmen.
 Abbildung: NASA



tenoptik in Hannover. Den Forschern ist es gelungen, eine Apparatur zur Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten, also von Materiepaketen, bei denen die einzelnen Atome alle den gleichen Zustand besetzen und eine Wellenfunktion beschreiben, unter Bedingungen der Schwerelosigkeit zu entwickeln. Für die Bildung eines Bose-Einstein-Kondensats werden Atome in einer Atomfalle im Vakuum zum Schweben gebracht und mit Lasern nahe den absoluten Temperaturnullpunkt bei Minus 273,15 Grad Celsius heruntergekühlt, so dass alle Atome den energetisch niedrigsten Zustand besetzen. Die QUANTUS-Apparatur erlaubt im freien Fall ein solches atomares Materiepaket zu generieren und dessen Entwicklung zu einem Objekt von Millimetergröße über eine Sekunde lang zu verfolgen. Die Wissenschaftler haben damit eine vielversprechende Quelle für Materiewellen entwickelt, die zukünftig in hochpräzisen Messgeräten zur Anwendung kommen können.

Verbesserte Navigation durch hochgenaue Uhren

Auch bei der Realisierung hochpräziser Uhren spielt das Quantenengineering eine zunehmend dominante Rolle. Wurde bei der klassischen Cäsium-Atomuhr die Frequenz der eingestrahelten Mikrowellen noch elektronisch gemessen, dient bei der optischen Uhr der Laser selbst zur Referenzmessung derjenigen La-

serfrequenz, die auf den optischen Übergang eines Atoms beziehungsweise Ions eingestellt wird, und zwar in Form eines Frequenzkamms.

Anwendung finden diese »Optischen Uhren« zum Beispiel in der Navigation. Hochgenaue Uhren an Bord von Navigationssatelliten sind eine Grundvoraussetzung für die Positionierung in Echtzeit. Durch den Einsatz von optischen Atomuhren erwarten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Verbesserung der Stabilität der Uhren um etwa einen Faktor 100.

Umweltmonitoring dank Quantenengineering

Laserinterferometrie wird in verschiedene Messverfahren der Geodäsie für höchste Genauigkeitsansprüche eingesetzt. Beispielsweise müssen für eine verlässliche Datenbasis die kleinen Distanzen zu frei fallenden Prismen in Erdschwerfeldsensoren, den sogenannten Absolutgravimetern, mit einer Präzision im Nanometerbereich gemessen werden. Eine noch größere Herausforderung ist es, wenn diese Methode bei Satelliten Anwendung findet. Die Analyse sehr genau vermessener Bahnstörungen bei niedrig fliegenden Satelliten erlaubt es, zeitliche Änderungen in der Massenverteilung im Erdsystem und im Schwerfeld der Erde zu bestimmen. Dieses Prinzip wird derzeit bei der gemeinsam vom Deutschen Zentrum für Luft- und

Raumfahrt (DLR) und der NASA koordinierten Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) genutzt. Aus den gewonnenen Daten wurden erstmals zuverlässige Zahlen für eine Vielzahl von Massenänderungen erhalten, zum Beispiel vom Rückgang der Eismassen in Grönland und in der Antarktis sowie Massenänderungen im Ozean bis hin zur Variabilität kontinentaler Wasserspeicher.

Für die nächste Generation von Schwerfeldsatelliten ist der Einsatz von Lasern zwischen den Satelliten geplant. Im Gegensatz zu der bisher bei GRACE eingesetzten Distanzmessung durch Mikrowellen wird die wesentlich höhere Messgenauigkeit solcher Quantensensoren erlauben, selbst hochdynamische Prozesse im globalen Wasserkreislauf sowie auf den Landgebieten der Erde mit einer bisher nicht erreichten Genauigkeit zu beobachten. Die Lasersysteme für solche Missionen werden in QUEST entwickelt und getestet.

Der Laser – Lösung und Aufgabenstellung zugleich

Das Quantenengineering liefert also maßgeschneiderte Systeme für hochpräzise Messtechnologien, die der sogenannten Quantenmetrologie völlig neue Perspektiven eröffnen werden. Diese und zahlreiche andere Experimente stellen hohe Anforderungen an die Stabilität der Laser. Da-



Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Jahrgang 1949, ist seit 1994 Professor für Experimentalphysik am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover und Koordinator des Exzellenzclusters QUEST. Kontakt: ertmer@iqo.uni-hannover.de



Dr. Ude Cieluch

Jahrgang 1971, ist seit 2010 an der Leibniz Universität Hannover und bei QUEST für den Bereich Kommunikation verantwortlich. Kontakt: ude.cieluch@quest.uni-hannover.de

her ist neben dem gezielten Einsatz auch die Entwicklung neuartiger hochpräziser Lasersysteme von großer Bedeutung. Letztlich ist der Laser also im Sinne des Quantenengineering's Lösung und Aufgabenstellung zugleich und daher in vielen Aspekten ein Motor der umfangreichen und themenübergreifenden Forschungsarbeiten in QUEST. Gleiches gilt auch für den Atom-Laser – also die Materiewellen mit den laserartigen Eigenschaften –, der in Zukunft als Quelle in der Interferometrie verwandt wird.

Der Exzellenzcluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) wird seit November 2007 im Rahmen der Exzellenzinitiative von Bund und Ländern gefördert. Die optimale Kombination aus theoretischer und experimenteller Expertise, gemeinsam mit der interdisziplinären Ausrichtung des Clusters, stellt ein Alleinstellungsmerkmal in der nationalen und internationalen Forschungslandschaft dar.

www.quest.uni-hannover.de