

# Physik am Limit

## QUEST SPANNT DEN BOGEN

### ZWISCHEN NANOTECHNOLOGIE UND WELTRAUMFORSCHUNG

In den letzten Jahren haben verschiedene Präzisionsmessungen Detailergebnisse ergeben, die beispielsweise im Bereich der dunklen Materie (dark matter) Erweiterungen des bisherigen Erklärungsmusters der Physik erfordern und somit fundamentale Fragen aufwerfen. Das Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST) stellt sich der hieraus erwachsenden Herausforderung und treibt die Forschung von und mit neuartigen Quantentechnologien in vier Forschungsschwerpunkten stark voran, um die fundamentalen Fragen einer Antwort näher zu bringen.



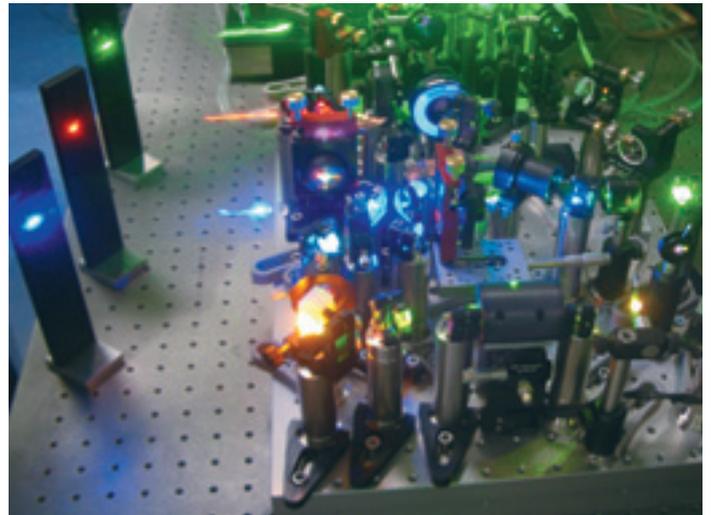
In den vergangenen achtziger und neunziger Jahren hat die physikalische und hier vor allem die astrophysikalische Forschung unsere Vorstellungen von der Struktur und den strukturbestimmenden Kräften des Universums dramatisch verändert. Damit stehen auch bisherige Modelle zur Gravitation und Raum-Zeit auf dem Prüfstand. Insbesondere ihre nicht nur naturphysikalisch wichtige Verknüpfung mit der Quantenwelt ist noch sehr unverstanden. In dieser Situation sind neben neuen theoretischen Ansätzen, wie etwa stringtheoretischen Konzepten, vor allem experimentelle Tests und Hochpräzisionsmessungen unabdingbar, um überhaupt neue Ideen und Ansätze generieren zu können.

Parallel zu diesen aufregenden Erkenntnissen haben Quantenphysiker gänzlich neue Methoden entwickelt, die auch die Präzision von Messungen der Raum-Zeit auf ein völlig neues Niveau heben. Diese Messungen werden zukünftig immer stärker nur noch von quantenphysikalischen und nicht technischen Grenzen limitiert sein. QUEST hat sich zum Ziel gesetzt, diese Forschungsbereiche zügig weiter zu entwickeln und in Gebiete vorzustoßen, in denen sich sogar die üblicherweise akzeptierten quantenphysikalischen Grenzen umgehen lassen.

Um diese Aufgabe optimal meistern zu können, ist QUEST in vier große Forschungsberei-

#### Was ist QUEST?

In dem Exzellenzcluster QUEST sind neben mehreren Instituten der Fakultät für Mathematik und Physik und der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie auch das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert Einstein Institut), das Laser Zentrum Hannover e. V., die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, Braunschweig) und das Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnik und Mikrogravitation (ZARM, Bremen) beteiligt.



che gegliedert, die inhaltlich eng zusammenarbeiten. Der gemeinsame Forschungscharakter wird zusätzlich durch die Einrichtung sogenannter »Task Groups« unterstützt, die auf die Kompetenz aller vier Hauptbereiche zurückgreifen können, um flexibel und schnell auf neue Herausforderungen oder auf interdisziplinäre Themenstellungen reagieren zu können. Im Folgenden werden die vier Hauptbereiche näher vorgestellt.

#### Bereich »Quanten Engineering«

Die neuen Möglichkeiten der Manipulation von Licht und Materie, die mit dem Begriff »Quanten Engineering« umschrieben werden, haben in den letzten Jahren die Atomphysik und Quantenoptik revolutioniert. Damit erschließt sich diesen Forschungsfeldern ein gänzlich neues Spektrum an Parameterbereichen: So wie man die kohärenten *Lichtwell-*

len des Laserlichts auch als Strom vieler *Lichtteilchen* bzw. *Lichtquanten* beschreiben kann, so zeigt ein *Teilchenstrom* extrem kalter Atome (durch Laserkühlung nahe an den absoluten Temperaturnullpunkt von ca.  $-273^{\circ}\text{C}$  gekühlt) mit sinkender Temperatur immer dominanter den Charakter einer kohärenten *Materiewelle*. Denkbar sind so genannte *Atomlaser*, die Materiewellen mit laserartigen Eigenschaften emittieren. Dies eröffnet der so genannten *Atomoptik* – wie der Laser in der Optik – in der Quantenoptik ein völlig neues Anwendungsspektrum sowohl in der fundamentalen Forschung wie auch in neuartigen technischen Anwendungen.

Es ist daher verständlich, dass Quanten Engineering einen eigenen großen Forschungsbereich in QUEST bildet. Dieses Feld bildet die Grundlage für die anderen Forschungsbereiche und Innovationen in dem Cluster. Hierzu zählen etwa neuartige Quantensensoren, die nächste Generation optischer Atomuhren, bei denen das »Pendel« im Takt der Lichtfrequenz (circa  $10^{15}\text{Hz}$ ) schwingt, Gravitationswellendetektoren der nächsten Generation oder neuartige Präzisionsmessgeräte für die Geodäsie.

QUEST verbindet somit synergetisch die vielfältigen Kompetenzbereiche in der Konzeption, Umsetzung und Handhabung von Quantensystemen auf den Gebieten der Atom- und Molekülphysik, der Quantenoptik und der Festkörperphysik. In diesem Sinne bietet Quanten Engineering eine Werkbank für neue Ideen, um die Forschung auf diesen Feldern voranzutreiben, ihre physikalischen Grenzen auszuloten und insbesondere neue, weit komplexere und gekoppelte Quantenphänomene zu untersuchen. Die experimentellen und theoretischen Methoden verschiedener Disziplinen werden hier zusammengeführt, um damit neue Kon-

trollmechanismen für Quantensysteme zu schaffen und zu erforschen.

### Bereich „Quantensensoren“

Diese Kontrolle ist die Voraussetzung zur Entwicklung von Quantensensoren der nächsten Generation. In diesem Bereich werden neue Gravitationswellendetektoren, optische Frequenznormale und Atomuhren sowie Inertialsensoren mit Licht- und Materiewellen entwickelt. Die vier weltweit existierenden Gravitationswellendetektoren sind die empfindlichsten Detektoren zur Messung von Längenunterschieden überhaupt: Die Längenänderung wird in den beiden Armen durch ein hochpräzises Interferometer gemessen. In GEO 600, dem Gravitationswellendetektor in Ruthe, südlich von Hannover, wird die

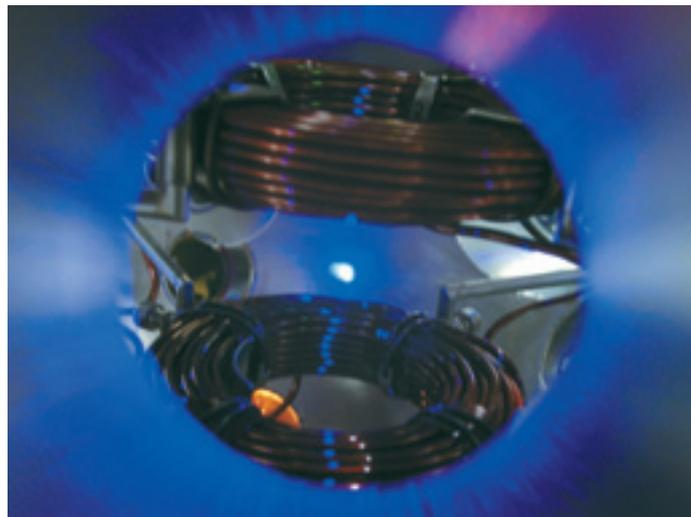


Abbildung links *Innovative Ansätze für Lasersysteme (hier ein RGB-Lasersystem, realisiert durch die Nutzung nichtlinearer optischer Effekte) bilden eine wichtige Grundlage für die Forschung an Quantensystemen und für die Manipulation von Atomzuständen.*

Quelle: Institut für Quantenoptik – AG: Morgner

Technik der nächsten Generation bereits getestet und eingesetzt. Um hier noch weiter zu kommen, wird in QUEST bereits intensiv an neuen Lichtquellen gearbeitet, die eine besondere Form des Lichts (»gequetschtes Licht«) verwenden, um die lichtbasierten Rauschbeiträge unter das so genannte *Quantenrauschlimit* zu drücken. Aus diesem Forschungsbereich resultieren auch die notwendigen Entwicklungen für den weltraumbasierten Gravitationswellendetektor »LISA«, der unter der wissenschaftlichen Federführung des Albert Einstein Institutes konzipiert wird. Das Potenzial der Atomoptik verspricht Atomuhren mit solch unvorstellbaren Genauigkeiten, dass allein schon die relativistische Rotverschiebung im Gravitationsfeld der Erde zwei Uhren, die sich in der Höhe über dem Labortisch nur um einen Zentimeter un-

■ ■ ■

Hier sind innovative Konzepte sowohl in der experimentellen als auch der theoretischen Physik gefragt, die auch neue Ideen aus der Mathematik und der mathematischen Physik erfordern. Dass hierbei zusätzlich neue technologische Lösungen für ganz andere Anwendungsfelder entstehen, ist nicht nur ein erwünschter Nebeneffekt. Der Name dieses Zentrums – QUEST – ist also in gewisser Weise auch sein Programm. QUEST wurde 2007 als Exzellenzcluster in das Exzellenzprogramm des Bundes aufgenommen.

Abbildung oben *Ultrakalte Atome nahe des absoluten Temperaturnullpunkts bilden die Grundlage für eine neue Generation von Quantendetektoren und hochpräzise Uhren, die QUEST-Forscher entwickeln. Hier ist eine Falle für Atome gezeigt, die durch den geschickten Einsatz von Lasersystemen und elektromagnetischen Feldern fast bis in den Ruhezustand abgebremst werden.*

Quelle: Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig.

terscheiden, messbar im Gang unterscheiden. Diese Forschungsarbeiten in QUEST gestatten hoch interessante Anwendungsmöglichkeiten in der Geodäsie, die damit den Geoid (Potenzial der Erd-



Abbildung oben  
*Simulierte Raum-Zeit-Struktur, die QUEST-Forscher detailliert erforschen möchten. Dazu werden sowohl neue theoretische Ansätze und Methoden entwickelt als auch experimentelle Studien durchgeführt.*

Abbildung rechts  
*Licht in allen Spektralfarben, erzeugt von einem ultrakurzen Laserpuls nach dem Durchlauf einer photonischen Kristallfaser. QUEST-Experten verstehen es meisterhaft, mit Licht zu arbeiten. Die Kontrolle, Manipulation und Formung von Licht und Laserpulsen bildet die Grundlage zur Forschung in QUEST.*

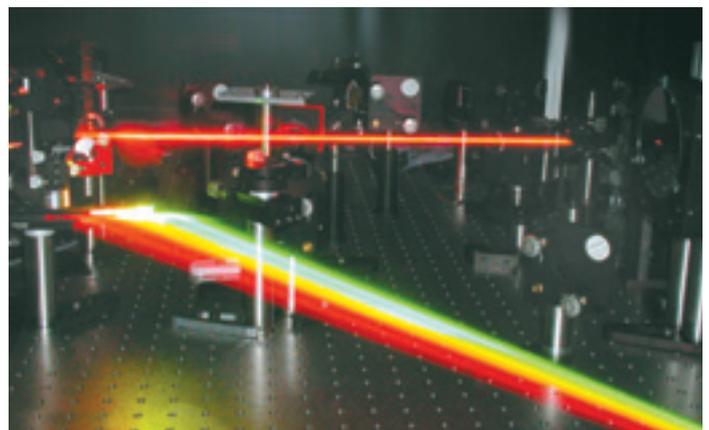
schwere) mit Hilfe dieser extrem präzisen Atomuhren höchstgenau vermessen kann. Andererseits werden in QUEST neue Atominterferometer konzipiert und gebaut, die als hochgenaue Inertialsensoren die besten »klassischen« Beschleunigungs- und Rotationsensoren bei weitem übertreffen werden. Diese Sensoren werden als weltraumtaugliche Sensoren z.B. den freien Fall verschiedener Massen – insbesondere auf Quantenniveau mit verschiedenen Elementen bzw. Isotopen – untersuchen, um damit das so genannte Äquivalenzprinzip immer genauer zu überprüfen; Dies könnte die ersten Hinweise für eine Theorie der unerforschten Quantengravitation liefern. Mit dem gleichen Ziel wird in QUEST versucht, die Konstanz der Naturkonstanten zu überprüfen, indem man höchstpräzise Atomuhren, die jeweils mit unterschiedlichen Isotopen als atomare Referenz betrieben werden, miteinander vergleicht.

#### Bereich »Raum-Zeit Forschung«

Auf der Jagd nach dem großen Ziel der fundamentalen Physik, der ultimativen Vereinigung von Quantentheorie und Gravitation, haben Theoretiker in

den letzten 30 Jahren verschiedene radikale Konzepte entwickelt, wie etwa die Stringtheorie mit ihren zusätzlichen Raumdimensionen. Alle diese Kandidaten sagen spezifische neuartige Raum-Zeit-Phänomene voraus, deren Größenordnung jedoch völlig unbekannt ist. Erwartet werden unter anderem Verletzungen des Äquivalenzprinzips (»alle Massen fallen gleich«), sich zeitlich ändernde »Fundamentalkonstanten« (etwa der Elementarladung), Fluktuationen der Raumzeit-Geometrie (»Raumzeit-Schaum«), anomale Lichtausbreitung im All, modifizierte Schwerkraft und ein Gravitationswellen-Echo des Urknalls.

Die in QUEST zu entwickelnden Präzisionsinstrumente sind hervorragend geeignet, um die Struktur von Raum und Zeit auf bisher unerreichter kleiner Skala zu sondieren und sind damit in der Lage, den genannten Phänomenen nachzuspüren. QUEST spannt hierbei einen Bogen zwischen Theorie und Experiment: Auf der einen Seite beeinflusst die theoretische Modellbildung die Anwendungen von QUESTs Quanten-Sensoren im Entwurf neuartiger Experimente mit Atomuhren, Trägheitssensoren (zur präzisen Messung von Beschleunigung,



Rotation und Inertialkräften), Gravitationswellendetektoren und beispielsweise dem Erde-Mond-System (Lunar Laser Ranging). Auf der

anderen Seite fokussiert eine Verbesserung der Präzision die Anstrengungen der Theoretiker und wird ihnen ermöglichen, ihre Modelle der Quantengravitation einzuengen. Die besondere Stärke von QUEST besteht in der einmaligen Mischung von Raum-Zeit-Sonden: Neue Quanten-Sensoren und Präzisionsuhren können die Konstanz der Naturkonstanten überprüfen und unterstützen beispielsweise millimetergenaue Erdvermessung, welche die Erforschung des Erdsystems revolutioniert und die Allgemeine Relativitätstheorie herausfordert. Zukünftige Gravitationswellen-Observatorien auf der Erde und im Welt- raum könnten unsere kosmologischen Vorstellungen vom Quanten-Ursprung unseres Universums testen und damit die Physik moderner Teilchenbeschleuniger komplementieren. QUEST kann nur gewinnen: Werden keine neuen Phänomene gefunden, schränkt dies die Theorien weiter ein; jede klare Entdeckung eines Signals der Quantengravitation hingegen wäre eine Sensation!

#### Bereich »Neuartige Technologien«

Die ambitionierten Ziele von QUEST beruhen zu einem

ganz wesentlichen Teil auf hoch entwickelten experimentellen Techniken, die in der Abteilung »Neuartige Technologien« auf höchstem Niveau

erforscht und weiter ausgebaut werden. Aufbauend auf der in Hannover traditionell starken laserphysikalischen Grundlagenforschung arbeiten auf diesem Feld hauptsächlich Gruppen des Laserzentrums, der PTB und des Instituts für Quantenoptik gemeinsam an der Entwicklung von Optischen Technologien der nächsten Generation. In diesem Bereich werden Lasersysteme erforscht und weiter entwickelt, die weltweit nur hier in Hannover zur Verfügung stehen. Sie zeichnen sich durch eine extrem hohe Lichtleistung, eine hohe Präzision in der Wellenlänge des Laserlichts oder durch geringes Rauschen aus. So bilden Lasersysteme aus Hannover auch die Basis der amerikanischen Gravitationswellendetektoren. Die hohen Anforderungen an die Laser gelten genauso auch für die optischen Einzelkomponenten, aus denen die Systeme zusammengesetzt sind, wie etwa die Laserspiegel oder spezielle Lichtleitfasern. Die Anforderungen an diese Komponenten werden immer höher: So müssen die Optiken extremen optischen Leistungen standhalten können oder zum Beispiel auch für den Einsatz in Weltraum tauglich sein, wie das in Hannover entwickelte



**Prof. Dr. Wolfgang Ertmer**

Jahrgang 1949, Koordinator von QUEST und Leiter der Arbeitsgruppe »Atomoptik und Lasermedizin« des Instituts für Quantenoptik, seit 1994 an der Leibniz Universität Hannover

temen erforscht. QUEST ermöglicht den beteiligten wissenschaftlichen Arbeitsgruppen, ihre weltweite Führungsposition weiter auszubauen beziehungsweise an anderen Stellen zu den führenden Gruppen in der Welt aufzuschließen.

#### Zusammenfassung

In allen vier Bereichen haben sich die QUEST-Forscher einiges vorgenommen. Im Rahmen dieser Vorhaben entstehen neue Arbeitsgruppen, die die Forschungsstärke der Insti-



**Prof. Dr. Uwe Morgner**

Vorstandsmitglied von QUEST und Leiter der Arbeitsgruppe »Ultrakurzzeit-Laseroptik« am Institut für Quantenoptik, seit 2004 an der Leibniz Universität Hannover

nern bereits in diesem Jahr geschaffen. Des Weiteren legt QUEST grossen Wert auf die Förderung von Nachwuchswissenschaftlern und bietet insgesamt mehr als 50 neue Stellen an. Zusammen mit den bereits existierenden Strukturen stellt damit die Region Hannover, Braunschweig und Bremen einen weltweit einzigartigen Forscherverbund im Bereich Quanten Engineering und Raum-Zeit Forschung dar – einen echten Leuchtturm in der Forschungslandschaft, der die Sichtbarkeit des Nordens von Deutschland international stark erhöht.



**Prof. Dr. Olaf Lechtenfeld**

Jahrgang 1959, Vorstandsmitglied von QUEST und Leiter der Arbeitsgruppe »Stringtheorie und Gravitationsphysik«, seit 1992 an der Leibniz Universität Hannover



Abbildung links  
Die Quest-Vertreter nach der Begutachtung v. l. n. r.:

hinten: PD Dr. Ernst-Maria Rasel, Prof. Dr. Uwe Morgner, Prof. Dr. Jürgen Müller, Prof. Dr.-Ing. Erich Barke, Prof. und Dir. Dr. Fritz Riehle, Prof. Dr. Olaf Lechtenfeld, PD Dr. Claus Lämmerzahl, Prof. Dr. Luis Santos, Heike von der Heide, PD. Dr. Ekkehard Peik  
vorne: Dr. Michèle Heurs, Prof. Dr. Karsten Danzmann, Prof. Dr. Jan Arlt, Prof. Dr. Klaus Hulek, Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Prof. Dr. Rolf Haug

Lasersystem für die kommende Merkurmission. Um das zu ermöglichen, werden neue Materialien und Konzepte für den Einsatz in optischen Sys-

tute enorm vergrößert. Beispielsweise werden durch QUEST acht neue W2- und W3-Professuren an der Leibniz Universität und bei den Part-