

Quantenmessungen an der Grenze

Der Exzellenzcluster QuantumFrontiers zielt darauf ab, Quanten- und Nanometrologie miteinander zu verbinden und deren Empfindlichkeit und Präzision zu verbessern.

Maike Pfalz

Metrologie ist die Wissenschaft vom Messen. Immer genauere Messmethoden haben schon immer die Wissenschaft insgesamt beflügelt und Durchbrüche vorbereitet. Daher ist die Metrologie eine der wichtigsten Grundlagen der Wissenschaft überhaupt. Der Exzellenzcluster QuantumFrontiers, den die Leibniz Universität Hannover und die Technische Universität Braunschweig gemeinsam mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig beantragt haben, widmet sich der Metrologie in der Quanten- und Nanowelt, in der uns auch heute noch viel Unbekanntes begegnet. Ziel dabei ist es, die Grenzen des Messbaren zu verschieben und damit neue wissenschaftliche Durchbrüche vorzubereiten.

Die Metrologie hat aber auch einen wirtschaftlichen Aspekt: So ist die Überwachung von Maßeinheiten die Basis für Handel und Industrie. Entsprechend hoch ist die Bedeutung von Metrologie für Wirtschaft und Gesellschaft.

Während die Rechnung an der Tankstelle oder des Stromanbieters heute noch auf präzisiertem Messen von Volumina und elektrischer Energie beruht, sind es in zukünftigen Produkten der Quantentechnologie quantenphysikalische Eigenschaften. Auch darauf müssen wir uns vorbereiten.

Um diese Ziele zu erreichen, untersuchen rund 360 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Licht und Materie an der Quantengrenze. Sie wollen lernen, die inneren und äußeren Freiheitsgrade von Quantenobjekten vollständig zu kontrollieren und mit Fortschritten in der Nanotechnologie die Basis für vielfältige Anwendungen und wissenschaftliche Experimente zu legen. Die Breite der Themen reicht von Nano-LED-Plattformen und chipbasierter Atomoptik über makroskopische Quanteneffekte, hochgenaue optische Uhren, die Untersuchung von Fundamentalkonstanten und die Entwicklung atominterferometrischer Methoden für Weltraummissionen bis zu relativistischer Geodäsie

◀ Justagearbeiten im Multi-Ionen-Labor der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig

oder zur Gravitationswellenastronomie. Der Cluster vereint Forschende aus theoretischer und experimenteller Physik sowie Ingenieurwesen und trägt zum technischen Fortschritt in Gebieten wie Geodäsie, Quantenoptik, Laserwissenschaft, Festkörperphysik, Elektrotechnik, Gravitationsphysik, Nanotechnologie und Quantenmetrologie bei.

Der Cluster gliedert sich in zwei Forschungsbereiche (**Infokasten**): Der Bereich A besteht aus fünf Forschungseinheiten und legt die theoretischen, konzeptionellen und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen für Anwendungen in der Messtechnik und Grundlagenphysik. Im Fokus stehen die fundamentalen Eigenschaften von Licht, Materie und ihren Wechselwirkungen. Dazu zählt es, verschiedene Systeme zu erforschen wie Ein-Elektronen- und Ein-Photonen-Quellen, Quantenpunkte, nanostrukturierte Spiegelschichten oder Spin-Quetschresonatoren. Diese Systeme erlauben es, Licht im Subwellenlängenbereich zu manipulieren und Metrologie mit Einzelquanten sowie Interferometrie mit starken nicht-klassischen Korrelationen durchzuführen. Zudem sollen maßgeschneiderte Quantensysteme, beispielsweise nichtklassische Zustände von Licht und Materie, den Weg ebnen zu verschränkungsunterstützter Interferometrie.

Im Bereich B decken sechs Forschungseinheiten Anwendungen vom Nanobereich einzelner Moleküle bis hin zu Gravitationswellendetektoren ab. Die Mitarbeitenden des Clusters entwickeln laserinterferometrische Auslesesysteme für terrestrische und weltraumgestützte Gravitationswellendetektoren, optische Uhren, Satellitengravimetrie oder quantenelektrische Standards. „Darüber hinaus haben wir mehr als 20 Topical Groups, in denen maximal 15 Personen bereichs- und institutionenübergreifend an spezifischen Themen arbeiten“, erläutert Piet Schmidt, einer der Cluster-Sprecher und Wissenschaftler an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Diese Struktur bietet die Möglichkeit, nach Abschluss eines Forschungsprojekts eine Topical Group aufzulösen und eine neue einzurichten – aktuell zum Thema Quantencomputing. „Diese dynamische Struktur hat sich als sehr erfolgreich erwiesen“, stellt Schmidt fest.

Forschung im Dreieck

Die enge Kooperation zwischen der Universität Hannover, der TU Braunschweig und der PTB bildet das Fundament des Clusters – das Quanten-Metrologie-Dreieck. „Diese enge Zusammenarbeit ist eine unserer Stärken“, ist Andreas Waag, Physikprofessor an der TU Braunschweig und einer der Cluster-Sprecher, überzeugt. „Die PTB leistet international angesehene Forschung zu Präzisionsmesstechniken, die Universität Hannover bringt Expertise vor allem in Quantenoptik und Grundlagenforschung mit und die TU Braunschweig im Ingenieurwesen und in der Mikroprozessierung.“ Diese Infrastruktur soll helfen, das

Forschungsfeld der Quantenmetrologie an der Schwelle zur technischen Verwertbarkeit gezielt zu fördern. „Jetzt haben wir die Gelegenheit, diese drei Institutionen noch enger zusammenwachsen zu lassen“, bekräftigt Michèle Heurs, Wissenschaftlerin am Institut für Gravitationsphysik der Universität Hannover / Albert-Einstein-Institut in Hannover und Sprecherin des Clusters.

Konkret geht es darum, die Quantensensorik, also Messungen am Quantenlimit und darüber hinaus, zu verbessern und in die Anwendungen zu bringen. In einem Projekt arbeiten die Forschenden daran, optische Uhren mittels neuer Quantenalgorithmen und Verschränkung noch genauer zu machen. Zudem entwickeln sie hybride Uhren, welche die extrem geringe statistische Unsicherheit von Neutralatomuhren mit der extrem hohen Genauigkeit von Ionenuhren verbinden. Diese nächste Generation optischer Uhren soll unter anderem in der relativistischen Geodäsie zum Einsatz kommen, um das Gravitationsfeld der Erde mit seinen zeitlichen Veränderungen zu erforschen. Das Schmelzen der polaren Eisschilde, der Anstieg des Meeresspiegels durch Wassereintrömungen oder Veränderungen im Wasserkreislauf können diese Veränderungen hervorrufen und sind essenziell, um den Klimawandel zu quantifizieren. „Entscheidend ist für uns, dass die Uhren nicht nur Selbstzweck sind, sondern auch konkreten Einsatz finden“, betont Piet Schmidt. Neben der Geodäsie dienen sie beispielsweise zur Überprüfung, ob sich die fundamentalen Naturkonstanten verändern, oder zur Suche nach Dunkler Materie. Ein wichtiges Ziel der ersten Jahre besteht darin zu zeigen, dass sich die Leistungsfähigkeit von Uhren und Atominterferometern durch Verschränkung und das Verständnis von Vielteilchensystemen tatsächlich verbessert.

Exzellenzcluster „QuantumFrontiers“

Beteiligte Institutionen:

Leibniz Universität Hannover (LUH), TU Braunschweig (TU BS), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI) Hannover, Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH), Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM), Bremen

Sprecher: Prof. Dr. Karsten Danzmann (LUH / AEI), Prof. Dr. Michèle Heurs (LUH / AEI), Prof. Dr. Piet O. Schmidt (PTB / LUH) und Prof. Dr. Andreas Waag (TU BS)



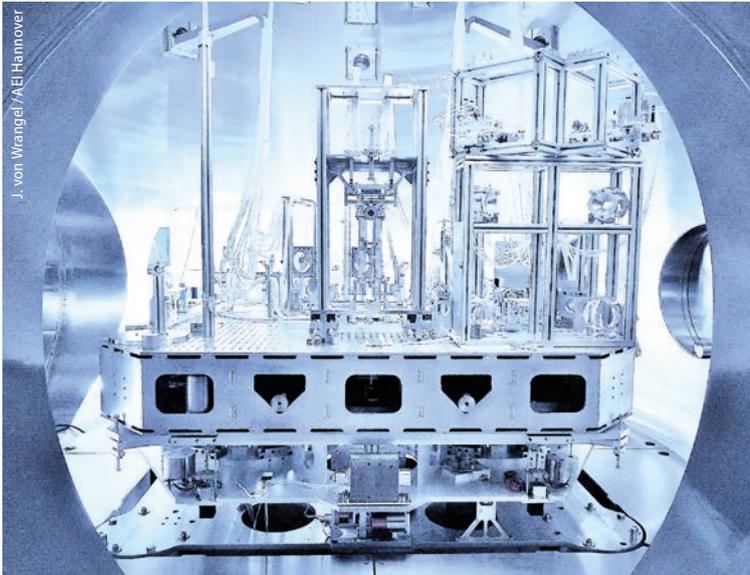
Forschungsbereiche:

A: Grundlagen der Metrologie

A1: Quantum- and Nano-Engineering of Light and Matter
A2: Many-Body Interacting Quantum Systems
A3: Solid-State Quantum Standards
A4: Quantum Optomechanics
A5: Enabling Technologies for Atomic Quantum Systems

B: Technologien

B1: Nano Light
B2: Quantum Gravimetry and Inertial Sensing
B3: Optical Clock Networks
B4: Relativistic Geodesy
B5: Gravitational Wave Astronomy
B6: Tests of Fundamental Physics



Das Bild zeigt den Blick in den zentralen Vakuumtank des 10-Meter-Prototypen am Albert-Einstein-Institut. In dieser Anlage wird ein Michelson-Interferometer aufgebaut, um das interferometrische Standard-Quantenlimit zu erforschen.

Ein weiteres Forschungsfeld des Clusters ist die Gravitationswellenastronomie mitsamt der Entwicklung von Technologien, um Gravitationswellen nachzuweisen. „Den Gravitationswellen liegen zwar kataklysmische kosmische Ereignisse zugrunde, nichtsdestotrotz sind die Effekte so winzig, dass sie Messungen am oder unterhalb des Quantenlimits erfordern“, verdeutlicht Michèle Heurs. Aktuell arbeiten die Forschenden des Clusters beispielsweise an gequetschtem Licht, das aufgrund seines reduzierten Photonschrotauschens die Gravitationswellendetektoren noch empfindlicher macht. Ein anderes Thema ist die Quantenoptomechanik, also die Forschung der Wechsel- und Rückwirkung zwischen Licht und Materie, damit das Quantenrauschen nicht die Gravitationswellendetektoren der nächsten Generation limitiert.

Doch der Cluster zielt nicht nur darauf ab, die Quantenmetrologie immer präziser zu machen, sondern auch robuster. „Letztlich wollen wir unsere Präzisionssysteme auch im Alltag verfügbar machen, beispielsweise in der Sensorik“, erklärt Andreas Waag. „Dazu gilt es, die sonst so fragilen Quantensysteme verlässlich zu beherrschen.“ Erste Ansätze gibt es in der Photonik bereits: Halbleitertechnologie soll Licht auf der Nanoskala manipulieren und die Herstellung von Nano-LED-Arrays ermöglichen, auf denen ganze Ensembles von Lichtemittern zusammengeschaltet und künftig auch phasenkontrolliert kombiniert sind. Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist es, chipbasierte photonische Plattformen herzustellen, um die komplette quantenmechanische Struktur von Licht zu prägen und vollständig zu kontrollieren. Eine mögliche Anwendung wäre ein hochauflösendes Mikroskop, das nicht größer ist als ein Smartphone. „Wir erzielen nicht nur in puncto Präzision exzellente Ergebnisse, sondern auch im Engineering unserer Technologien und beim Verfügbarmachen präziser Quantensysteme“, hebt Andreas Waag hervor.

Strukturen für die Spitzenforschung

Der Exzellenzcluster konnte beim Start auf bestehende Grundlagen aufbauen, die im Exzellenzcluster Quest in den Jahren 2007 bis 2012 gelegt wurden. Ein wichtiger Erfolg war beispielsweise die Einrichtung der Quest-Leibniz Forschungsschule als fakultätsübergreifende Struktur, die schneller, dynamischer und flexibler Projekte ermöglichen kann. „Diese Struktur ist das Modell der Zukunft und aufgrund der Positionierung über die Fakultäten hinweg für die Forschungsgovernance an Universitäten unglaublich wichtig“, betont Michèle Heurs. Auch das neue DLR-Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik in Hannover ist aus der Arbeit des früheren Clusters hervorgegangen.

Durch die TU Braunschweig als neuen antragstellenden Partner zielt die Arbeit von QuantumFrontiers aber noch mehr auf Anwendungen ab. „Die Quantentechnologie muss heraus aus den spezialisierten Laboren und rein in die Anwendung. Dies hat auch eine Studie von acatech als eine der wichtigsten Herausforderungen für die Quantenrevolution 2.0 hervorgehoben“, führt Andreas Waag aus. Die Quantenmetrologie ist an der TU Braunschweig als Forschungsschwerpunkt fakultätenübergreifend positioniert.

Auch die bauliche Infrastruktur lässt kaum Wünsche offen: So bietet das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) in Hannover Laborräume für Atomoptik sowie einen zugehörigen Reinraum. Das Hannover Institute of Technology verfügt über Labore für ultrapräzise Uhren, Laser- und Atominterferometrie sowie für die Entwicklung miniaturisierter optischer Komponenten für transportable Quantensensoren. Und das Laboratory for Emerging Nanometrology an der TU Braunschweig ist mit Highend-Instrumenten für hochauflösende Bildgebung, orts- und zeitaufgelöste Spektroskopie sowie Oberflächenmanipulation und -analyse ausgestattet. „Wir müssen kein Geld mehr für Backsteine ausgeben, sondern können die Sahnehäubchen obendrauf finanzieren“, freut sich Andreas Waag. Wichtig sei es dabei, die finanziellen Mittel flexibler einsetzen zu können, um auf neue Forschungsthemen schneller reagieren zu können. „Wir schaffen hier eine Ursuppe, aus der heraus neue Themen entstehen können“, vergleicht Waag.

Knapp zweieinhalb Jahre nach Beginn der Förderung als Exzellenzcluster kann QuantumFrontiers bereits auf strukturelle Erfolge zurückblicken. Ende vergangenen Jahres bewilligte die DFG den Sonderforschungsbereich TerraQ, der darauf abzielt, neue quantenbasierte Methoden zu entwickeln, um Schwerfeldvariationen im Weltraum und auf der Erde mit bisher unerreichter Genauigkeit zu bestimmen. Darüber hinaus unterstützen das Land Niedersachsen und die VolkswagenStiftung die Initiative Quantum Valley Lower Saxony mit insgesamt 25 Millionen Euro. Hier geht es darum, in den nächsten fünf Jahren in Niedersachsen den ersten Quantencomputer auf Basis der Ionenfallentechnologie mit 50 Qubits zu entwickeln.

Um wichtige Kernbereiche strategisch zu unterstützen, sind einige wenige Professuren ausgeschrieben. Die meisten neuen Stellen betreffen allerdings eher den wissenschaftlichen Nachwuchs, nämlich unabhängige Gruppenleiter

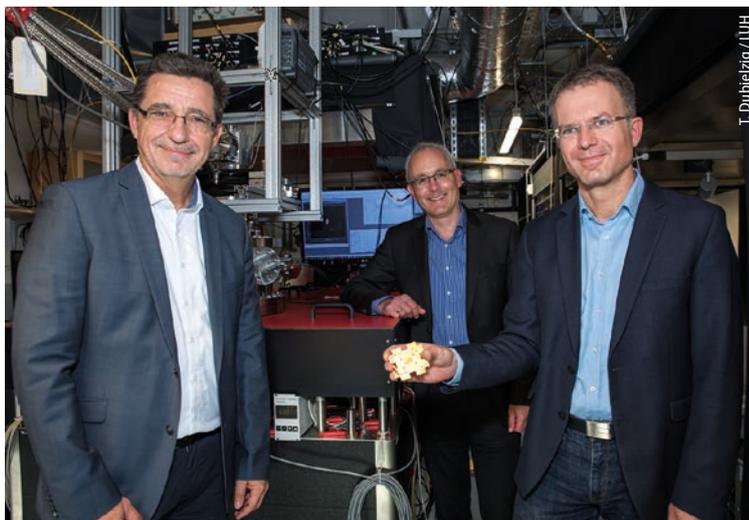
und vor allem Postdocs. „Wir möchten den jungen Leuten eine Perspektive bieten, um sich im Idealfall für eine Professur weiterzuqualifizieren“, betont Piet Schmidt.

Eine weitere Maßnahme ist die Einrichtung eines Masterstudiengangs „Quantum Engineering“, den die TU Braunschweig und die Universität Hannover gemeinsam anbieten wollen. „Das ist zwar ein riesiger Aufwand, aber entscheidend, um in der zweiten Quantenrevolution eine neue Generation Studierender gezielt auszubilden und für exzellenten Nachwuchs zu sorgen“, sagt Michèle Heurs. Der Studiengang bringt Studierende aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften zusammen, um den Bedarf an gut ausgebildeten Nachwuchsforschenden in diesem Bereich zu decken. Dieser ist riesig, auch aufgrund internationaler Initiativen wie dem Quantum Flagship.

Die Nachwuchsförderung setzt auch bereits in den Schulen an: So bietet der Cluster mit foeXlab ein Schülerlabor sowie Masterclasses zu den zentralen Forschungsthemen an, wo besonders interessierte Schülerinnen und Schüler zunächst eine einleitende Vorlesung hören und anschließend selbst experimentieren können. „Das soll inspirierend wirken, weil die Jugendlichen hierbei Forschung tatsächlich ‚on the job‘ kennenlernen können“, erläutert Michèle Heurs. Dabei ist auch die Physikdidaktik eingebunden.

Ein einzigartiges Dreieck

Der Verbund aus dem international anerkannten Metrologieinstitut und den beiden Universitäten, von denen eine mehr technisch orientiert ist und die andere starke Grundlagenforschung in den Quantentechnologien betreibt, ist weltweit einzigartig. „Es gibt nur wenige Gruppen weltweit, die in diesem Gebiet auf diesem hohen Niveau forschen, aber die sind nicht so breit aufgestellt wie wir“, führt Piet Schmidt aus. Den starken Verbund ergänzen das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation in Bremen, das Laserzentrum Hannover e.V. sowie das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik. „Das ist ein



Andreas Waag, Piet Schmidt und Christian Ospelkaus (von links) arbeiten an einem Quantencomputer auf Basis der Ionenfallentechnologie.

einzigartiges Konglomerat von Kompetenzen und Einrichtungen“, ist Michèle Heurs überzeugt.

Die Metrologie hat nicht nur für die Wissenschaft eine hohe Bedeutung, sondern auch für unser tägliches Leben. Hierbei spielen immer zwei Dinge eine wichtige Rolle: eine hohe Präzision und die Möglichkeit, diese in täglichen Anwendungen einzusetzen. „Die Aufgabe unseres Clusters ist es, diese beiden Aspekte von Grund auf zu bearbeiten“, fasst Andreas Waag zusammen.

Die Exzellenzcluster

In loser Folge stellt das Physik Journal die Cluster der Exzellenzstrategie mit Schwerpunkt in der Physik bzw. starker Beteiligung von Physikerinnen und Physikern vor.

Das Physikportal
pro-physik.de

Registrieren Sie sich jetzt auf
www.pro-physik.de/user/register
 und folgen Sie uns auf Facebook
 und Twitter.

WILEY-VCH

Für alle, die bei
Metrologie
 nicht an Wetter
 denken

Adobe Stock/juliasuchits