

Unimagazin

Forschungsmagazin der Leibniz Universität Hannover
Ausgabe 03|04 • 2018

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

HiTec Das Hannover Institute of Technology
Ein transdisziplinäres Zentrum für Quanten-Engineering



Mitra Ariatabar
Ingenieurin Netzplanung

Wir machen **Energiewende**

Wir suchen Dich!

Bei TenneT machst Du nicht irgendeinen Job. Du bewirkst etwas und gestaltest die Energiewende aktiv mit!

TenneT ist einer der führenden Übertragungsnetzbetreiber in Europa. Mit rund 4.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern versorgen wir circa 41 Millionen Endverbraucher in den Niederlanden und in Deutschland rund um die Uhr mit Strom. In den nächsten zehn Jahren investieren wir 28 Milliarden Euro in den Ausbau und Betrieb unserer Netze.

Für diese Aufgaben suchen wir Verstärkung in den Bereichen:

Ingenieurwesen – Elektro-/Energietechnik – Projektmanagement – IT

Bewirb Dich jetzt!

karriere.tennet.eu



Editorial

LIEBE LESERIN, LIEBER LESER,

von der ersten Idee an hat es neun Jahre lang gedauert, bis das Hannover Institute of Technology (HITec) in diesem Juli eröffnet werden konnte. In dem Spezialbau an der Callinstraße, der sich durch eine extrem gute Vibrations- und Temperaturstabilität auszeichnet, sind vor allem Labore untergebracht, die sich besonders für Präzisionsexperimente auf dem Quantenniveau eignen. Zudem beherbergt das HITec drei Großgeräte, die in ihrer Kombination weltweit einmalig sind: Von außen sichtbar ist das wohl auffälligste Merkmal der sogenannte Einstein-Elevator – ein Fallturm der neuen Generation, in dem Experimente mit hoher Wiederholrate unter Bedingungen der Schwerelosigkeit durchgeführt werden können. Eine weitere Besonderheit stellt eine Faserziehanlage dar, die die Entwicklung und Herstellung von Glasfasern beispielsweise für weltraumtaugliche Anwendungen ermöglicht. Das dritte Großgerät ist eine sogenannte Atomfontäne, der VLBAI – Very Long Baseline Atom Interferometry, mit dessen Hilfe hochpräzise Messtechnologien auf Basis von Materiewellen erforscht, getestet und entwickelt werden.

In den neuen Laboren können bis zu 120 Forschende aus den Bereichen Geodäsie, Physik und Ingenieurwissenschaften aus drei Forschungsrichtungen unter einem Dach arbeiten:

- **Quantentechnologien:** Erforschung grundlegender quantenphysikalischer Phänomene und deren Manipulation
- **Optische Technologien:** Die durch neuartige Quantentechnologien ermöglichte Entwicklung geeigneter Sensorkonzepte und Technologieplattformen
- **Entwicklung und Einsatz von Quantensensoren:** Erprobung und Fertigung neuartiger Quantensensoren zum Einsatz im Labor, in terrestrischen Kampagnen und in Weltraummissionen

Alle drei Forschungsgebiete fügen sich eng in die Kernthemen der beiden von Bund und Länder geförderten Exzellenzcluster der Leibniz Universität ein: Quantum-Frontiers (Grundlagenforschung mit Licht und Materie an der Quantengrenze) und PhoenixD (interdisziplinäre Verschmelzung von Photonik, Optik und Ingenieurwesen).

Das neue Unimagazin bietet einen Einblick in die Entstehung des HITec und die spannenden Forschungsfelder, die dort bearbeitet werden: Einleitend beschreibt der Geschäftsführer den Entstehungsprozess und den Bau des HITec, anschließend stehen die drei genannten Großgeräte im Mittelpunkt. Wie sich Geodäsie und Quantenphysik miteinander verbinden und so die Entwicklung von Multi-Sensor-Systemen (MSS) vorantreiben, ist ein weiteres Thema im Heft. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler berichten zudem darüber, wie vom Welt- raum aus das Erdschwerefeld vermessen werden kann. Mitarbeiter des Sonderforschungs- bereichs »Relativistische Geodäsie und Gravimetrie« erläutern, wie neue Beobachtungsverfahren und Instrumente für geodätische Anwendungen in den HITec-Laboren entwickelt werden, um die Massenvariationen der Erde zu beobachten. Des Weiteren zeigen die Forschenden optische Uhren in der Anwendung und erläutern, wie verschränkte Atome Präzisionsmessungen verbessern können. Abschließend wird eine Forschungslinie der Wissenschaftsallianz Braunschweig – Hannover sowie der Sonderforschungsbereich 1227 DQ-mat vorgestellt.



Viel Freude beim Lesen wünscht Ihnen

Prof. Dr. Volker Epping
Präsident der
Leibniz Universität Hannover



Entfalten
Deine
Stärken!



Gerne zur Arbeit kommen und nach Feierabend auf einen guten Job zurückblicken?

Die Viscom AG in Hannover schafft die Voraussetzungen dafür – als europäischer Technologieführer für modernste Inspektionssysteme, die in der Elektronikindustrie höchste Qualität garantieren. Unsere Teams im Bereich Entwicklung, Applikation, Fertigung, Vertrieb und Verwaltung bauen wir weiter aus und suchen Verstärkung: Menschen, die die Zukunft mitgestalten wollen und echte Teamplayer sind.

Wir bieten eine leistungsgerechte Vergütung, flexible Arbeitszeit, moderne Arbeitsplätze, Kantine, Kinderbetreuung, Gesundheitsförderung, Schulungen und vieles mehr.

Bewirb Dich initiativ oder auf eines unserer Stellenangebote auf

www.viscom.de



DIK – Kompetenz in Kautschuk und Elastomeren

Das DIK bietet ein breites Forschungs- und Leistungsspektrum

- Werkstoffcharakterisierung
- Neue Materialien
- Werkstoffentwicklung
- Lebensdauervorhersage/Alterung
- Aus- und Weiterbildung
- Simulation
- Umweltaspekte
- „Leachables“ in Polymerwerkstoffen



Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V.

30519 Hannover
Eupener Straße 33
Tel: +49 (0)511/84201-16
PR-DIK@DIKkautschuk.de

HiTec

DAS HANNOVER INSTITUTE OF TECHNOLOGY (HITEC) –

EIN TRANSDISZIPLINÄRES ZENTRUM FÜR QUANTEN-ENGINEERING

Unimagazin

Forschungsmagazin der Leibniz
Universität Hannover • ISSN 1616-4075

Herausgeber

Das Präsidium der Leibniz Universität
Hannover

Redaktion

Monika Wegener (Leitung),
Dr. Anette Schröder

Anschrift der Redaktion

Leibniz Universität Hannover
Alumnibüro
Welfengarten 1
D-30167 Hannover

Anzeigenverwaltung / Herstellung

ALPHA Informationsgesellschaft mbH
Finkenstr. 10
D-68623 Lampertheim
Telefon: 06206 939-0
Telefax: 06206 939-232
Internet: www.alphapublic.de

Titelabbildung

Leibniz Universität Hannover,
Michael Matthey

Das Forschungsmagazin Unimagazin
erscheint zweimal im Jahr. Nachdruck
einzelner Artikel, auch auszugsweise,
nur mit Genehmigung der Redaktion.
Für den Inhalt der Beiträge sind die
jeweiligen Autoren verantwortlich.

Alexander Wanner | Wolfgang Ertmer |
Tobias Froböse

Institut für Quantenoptik, Quest Leibniz
Forschungsschule

6 **Das Hannover Institute of Technology
(HiTec) der Leibniz Universität**

Ideale Bedingungen für Spitzenforschung

Ernst Rasel | Dennis Schlippert |
Étienne Wodey

Institut für Quantenoptik

10 **Der VLBAI-Teststand**

Ein Fallturm für Atome

Ludger Overmeyer | Sebastian Lazar |
Christoph Lotz

Institut für Transport- und
Automatisierungstechnik

14 **Der Einstein-Elevator**

Der weltweit erste Fallturm neuer
Generation mit hoher Wiederholrate

Detlev Ristau | Axel Rühl |
Matthias Ließmann

Institut für Quantenoptik

20 **Mehr als nur Lichtleitung**

Innovative Glasfaserherstellung am HITEC

Ludger Timmen | Tobias Kersten | Jürgen
Müller | Manuel Schilling | Steffen Schön |
Jens-André Paffenholz | Ingo Neumann

Institut für Erdmessung, Geodätisches Institut

24 **Das HiTec als Herzstück**

Geodäsie und Quantenphysik verbinden sich

Moritz Mehmet | Oliver Gerberding |
Vitali Müller | Vitus Händchen |
Katharina-Sophie Isleif

Zentrum für Gravitationsphysik,
Albert-Einstein-Institut

30 **Vom All aus:**

Ein weltraumbasierte Laserinterferometer
vermisst das Erdschwerefeld

Harald Schnatz | Anna-Greta Paschke |
Piet O. Schmidt

Institut für Quantenoptik, Physikalisch-
Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig

36 **Ultragenaue Taktgeber:**

Optische Uhren in der Anwendung

Carsten Klempt | Wolfgang Ertmer
Institut für Quantenoptik

40 **Spukhafte Fernwirkung zwischen
kalten Atomen**

Wie verschränkte Atome Präzisions-
messungen verbessern

Matthias Weigelt | Jürgen Müller |
Karsten Danzmann | Fumiko Kawazoe
Institut für Erdmessung, Institut für
Gravitationsphysik

44 **Die Vermessung der Erde:**

Neue Methoden zur Beobachtung von
Massenvariationen

Alexander Wanner | Wolfgang Ertmer |
Andreas Waag | Thorben Dammeyer
Institut für Quantenoptik, Institut für
Halbleitertechnik der TU Braunschweig,
Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig

48 **QUANOMET**

Eine Forschungslinie der strategischen
Allianz Braunschweig – Hannover

Alexander Wanner | Klemens Hammerer |
Piet O. Schmidt

Institut für Quantenoptik, Institut für
Theoretische Physik, Quest Leibniz
Forschungsschule

52 **Sonderforschungsbereich 1227 DQ-mat:**

Designte Quantenzustände und deren
Anwendung in der Grundlagenforschung

56 **Personalien und Preise**

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Wir danken unseren Förderinnen und Förderern:

Albert-Ludwig-Fraas-Stiftung | BRANDI Bielefeld GbR | Bundesdruckerei GmbH | Christian-Kuhlemann-Stiftung | Cray-Stiftung | Deloitte Consulting GmbH | Dirk Rossmann GmbH | Dr. Friedrich-Lehner-Stiftung | DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH | d-fine GmbH | Ed. Züblin AG | enercity AG | ExxonMobil Production Deutschland GmbH | FERCHAU Engineering GmbH | Förderverein Soroptimist Club Hannover e.V. | Freunde der Herrenhäuser Gärten e.V. | Gebrüder Heyl Analysetechnik GmbH & Co. KG | Hannoversche Volksbank eG | Hans Dederding GmbH | HARTING Stiftung & Co. KG | Kjellberg-Stiftung | Lenze SE | Magrathea Informatik GmbH | Mecklenburgische Versicherungs-Gesellschaft a. G. | MTU Maintenance Hannover GmbH | NORD/LB Norddeutsche Landesbank | OSB AG | Phoenix Contact GmbH & Co. KG | Rheinmetall AG | Sartorius Corporate Administration GmbH | Sparkasse Hannover | Talanx AG | TRANSNORM System GmbH | TÜV NORD GROUP | Verein Haus Schleswig-Holstein e.V. | VGH Versicherungen - Landschaftliche Brandkasse Hannover | VHV Stiftung | Viscom AG | Volkswagen AG, Volkswagen Nutzfahrzeuge | Nil und Torhan Berke | Dr. h. c. Edelgard Bulmahn | Prof. Dr. Michael Breitner | Nina Dieckmann | Wilhelm Lindenberg | Prof. Dr. Rainer Parchmann | Jürgen Rehmer

**Deutschland
STIPENDIUM**

©Teak Sato/www.sxc.hu

Auch als Privatperson können Sie fördern:
<https://www.uni-hannover.de/deutschlandstipendium>

Weil langes statisches Sitzen krank macht!

3D High Tech Sitzsysteme mit patentierter Schwingtechnologie für deutlich weniger Rückenleiden.

BSJ
BÜRO SYSTEME JÄKEL

30 Jahre Partner der Uni Hannover

www.bsj-gmbh.de

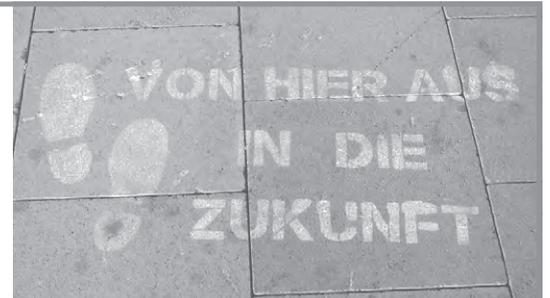
Lilienthalstraße 1 · 30916 Isernhagen · Tel.: 0511 616803-0 · Fax: 0511 616803-17 · E-Mail: info@bsj-gmbh.de



Laser
AKADEMIE

Ihr Weiterbildungspartner
in den optischen Technologien

www.lzh-laser-akademie.de
kontakt@lzh-laser-akademie.de
0511-2771729



Es liegt uns im Blut.
Ihnen auch?



Octapharma Produktionsgesellschaft Deutschland mbH

in Springe bei Hannover ist einer von weltweit insgesamt fünf Produktionsstandorten der Octapharma Gruppe.

Octapharma ist auf die Entwicklung und Herstellung von hochreinen Arzneimitteln aus menschlichem Blutplasma spezialisiert und erfüllt höchste Anforderungen an die Qualität und Sicherheit der Herstellungsprozesse. Da unsere Produktionsstandorte kontinuierlich ausgebaut werden, freuen wir uns über neue engagierte Mitarbeiter, mit denen wir unser starkes Wachstum gemeinsam vorantreiben können, um den Patienten weiterhin ein besseres Leben zu ermöglichen...denn es liegt uns im Blut!

Wir suchen:

- Proaktive und ideenreiche Mitarbeiter, die gern im Team arbeiten und Verantwortung übernehmen

Sie sind:

- Motivierte/r Absolvent/in der Fachrichtung Biomedizintechnik, Life Science, Biochemie, Verfahrenstechnik, Elektrotechnik oder IT

Wie bieten:

- Interessante Einstiegsmöglichkeiten im Traineeprogramm oder Direkteinstieg
- Neben spannenden Herausforderungen moderne und sichere Arbeitsplätze in einer Zukunftsbranche

Octapharma Produktionsgesellschaft Deutschland mbH • Wolfgang-Marguerre-Allee 1 • 31832 Springe
Tel.: 05041 77918 400 • E-Mail: bewerbung-springe@octapharma.com • www.octapharma.com/career

octapharma

Das Hannover Institute of Technology (HITec) der Leibniz Universität

IDEALE BEDINGUNGEN FÜR SPITZENFORSCHUNG

Mit dem Hannover Institute of Technology (HITec) ist im Juli 2018 ein weltweit einmaliges Forschungszentrum in Betrieb gegangen. Unter Beteiligung der Fachgebiete Physik, Geodäsie und Ingenieurwissenschaften soll hier Grundlagenforschung, angewandte Forschung sowie Technologieentwicklung betrieben werden. Der Technische Leiter und der Geschäftsführer des HITec haben den Entstehungsprozess begleitet.

Im 21. Jahrhundert spielt die Beobachtung von Veränderungsprozessen auf der Erde vom Weltraum aus eine immer größere Rolle. Um solche Prozesse, die sich typischerweise über längere Zeiträume erstrecken, immer besser zu verstehen, einordnen zu können und letztlich auch zu dokumentieren, bedarf es einer zuverlässigen Datenbasis. Dazu werden sehr präzise Messtechniken benötigt, die trotz des widrigen Umfeldes zuverlässig funktionieren müssen. Hier bietet der gezielte Einsatz von Quantensensoren, neben innovativen photonischen und optischen Technologien völlig neue Perspektiven.

Diesen Zielen widmete sich auch der Exzellenzcluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) der von 2007 bis 2012 an der Leibniz Universität Hannover im Rahmen der Exzellenzinitiative gefördert worden ist. Sein Schwerpunkt war das Quantenengineering und die Raum-Zeit-Forschung und folgerichtig ist hier auch der Grundstein für HITec, das Hannover Institute of Technology, gelegt worden (siehe Abbildung 1). Seit Juli 2018 steht das neue Forschungsgebäude den Nutzern zur Verfügung und bildet das infrastrukturelle Rückgrat für zukünftige interdisziplinäre Spitzenforschung an der Leibniz Universität Hannover für den genannten Wissenschaftsbereich unter dem Dach der QUEST Leibniz-



Forschungsschule (QUEST-LFS). Im HITec werden künftig grundlegende Fragestellungen der Physik untersucht, so zum Beispiel »Sind die Naturkonstanten wirklich konstant?«. Zudem sollen für die Beobachtung von Umweltprozessen neuartige Sensoren und Methoden entwickelt werden, um sowohl lokale wie globale Massenveränderungen, zum Beispiel Eismassenverlust durch Folgen der Klimaerwärmung, mit bislang unerreichbarer Qualität zu erfassen.

Die Forschung der QUEST-LFS, die aus QUEST hervorgegangen ist, wurde beziehungsweise wird durch Drittmittel der beteiligten Institute, zwei Sonderforschungsbereiche (»geo-Q – Relativistic Geodesy and Gravimetry with Quantum Sensors« und »DQ-mat – Designed Quantum States of Matter«) sowie

durch Sondermittel des Landes Niedersachsen gefördert. Für letztere sind die Sonderprogramme »FPM – Foundations of Physics and Metrology« zur Förderung der Spitzenforschung in Niedersachsen und »QUANOMET – Quantum- and Nanometrology« der Wissenschaftsallianz der Technischen Universität Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover zu nennen. Zusätzlich sind QUEST-LFS Forschende an den Cluster-Anträgen *Quantum-Frontiers* und *PhoenixD* der Leibniz Universität Hannover im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder beteiligt.

Am HITec arbeiten Forscherinnen und Forscher aus der Physik, der Geodäsie und den Ingenieurwissenschaften zusammen. Aufgrund dieser Interdisziplinarität der For-

schung war für das HITec ein Standort wichtig, der nicht weit von den beteiligten Institutionen entfernt ist. Dieser wurde an der Callinstraße in der Nähe der Hauptmensa vor dem Hochhaus Appelstraße (siehe Abbildung 2) gefunden.

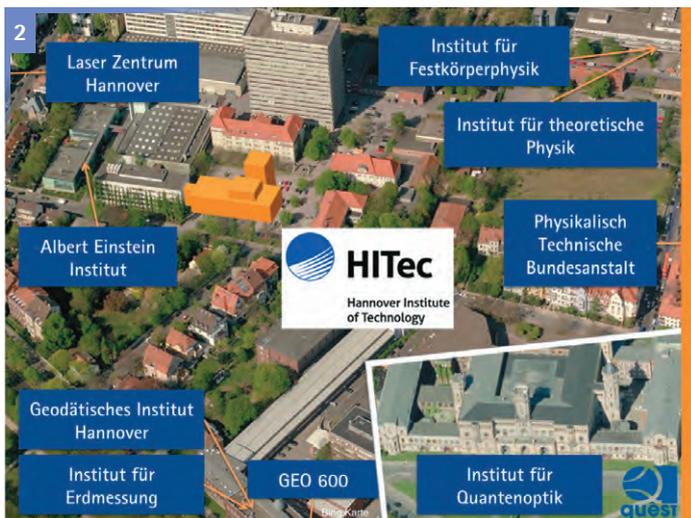
Mit der Planung für das HITec wurde Ende 2011 begonnen. Nach einer sehr langen Planungsphase aufgrund der hohen Komplexität des Gebäu-

für zukünftige HITec-Servicebereiche saniert wurde und ein damit verbundener Neubau. Der Neubau besteht ausschließlich aus Laboren und ist mit einer Grundfläche von 1500 Quadratmetern für 100 bis 120 Forschende ausgelegt. Er verfügt über zwei Reinräume und 24 hochwertige Laserlabore. Ebenso gehören zum Gesamtumfang des HITec auch drei Großgeräte. Dazu zählen eine Faserziehanlage

Quantenniveau beziehungsweise am Quantenlimit zu ermöglichen, mussten bei der Planung und Ausführung des HITec besondere Anforderungen erfüllt werden: Zum einen eine optimale Schwingungsisolierung der Räume und eine hohe Steifigkeit des Gesamtgebäudes sowie zum anderen eine extrem hohe Temperaturstabilität innerhalb der Labore.

Erreicht wird die extrem gute Schwingungsisolierung unter anderem dadurch, dass der gesamte Laborbau in drei Gebäudeteile untergliedert ist (siehe Abbildung 3). Diese drei Gebäudeteile sind durch Dehnungsfugen baulich voneinander getrennt. Ebenso wurde bei allen Installationen, die die einzelnen Gebäudeteile miteinander verbinden, auf eine entsprechende Entkopplung geachtet. Zu den Gebäudeteilen zählt neben dem Labortrakt der Techniktrakt, in dem die zentralen Lüftungsanlagen, die Kälteerzeugung und auch der Lastenaufzug untergebracht sind. Der Gebäudeteil des Einstein-Elevators beinhaltet das Großgerät sowie die zugehörige Versuchsvorbereitung und den Kontrollraum.

Der Laborteil (siehe Abbildung 4) gliedert sich in zwei Laborspangen, die im Inneren des Gebäudes Rücken an Rücken liegen. Das Fehlen von Fenstern und Tageslicht ist hier gewollt, da es sich bei den HITec Laboren ausnahmslos um

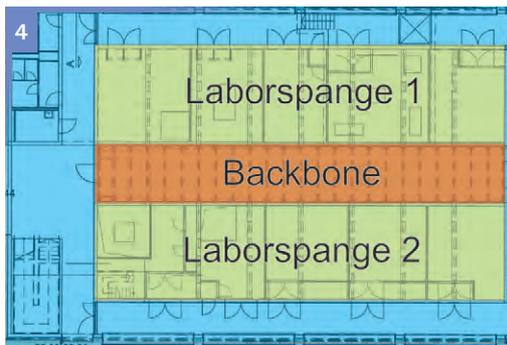
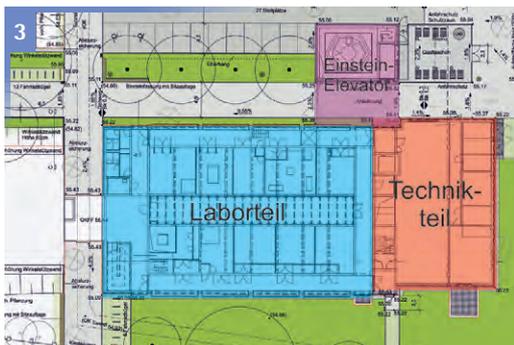


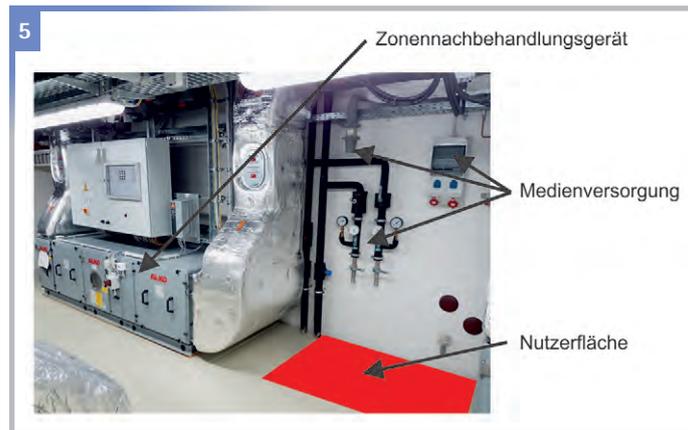
des, die sich aus den hohen Anforderungen an die Labore und im HITec integrierte größere Infrastrukturprojekte ergeben, wurde im September 2014 mit dem Bau begonnen. Dieser erstreckte sich bis zur Übergabe an die Leibniz Universität Ende Mai 2018.

zur Herstellung weltraumtauglicher aktiver Glasfasern, ein Very Long Baseline Atom Interferometer (VLBAI) und der Einstein-Elevator zur Durchführung von Versuchen unter verschiedenen Gravitationsbedingungen inklusive Schwerelosigkeit. Diese Großgeräte werden separat beschrieben.

Das HITec umfasst zwei Gebäude: ein Bestandsgebäude, welches als Bürogebäude und

Um optimale Bedingungen für die Forschung auf dem





Räume handelt, die in ihrer Ausstattungsqualität als Quantenoptik und Laserlabore geeignet sind. Die Laborspannen sind umgeben von einem großzügigen Flur mit großen Fenstern. Durch die Entkopplung des Estrichs der Flure wird kein Trittschall in die Labore übertragen. Zwischen den beiden Laborspannen befindet sich der sogenannte »Backbone«, also das Rückgrat des Gebäudes. Der Boden des »Backbones«, der aus Betonfertigteilen und Gitterrosten besteht, ist auf Elastomer-Lagern aufgelegt. So werden keine Schwingungen vom »Backbone« in die Labore übertragen. Der Backbone ist zu einem großen Teil mit Gebäudetechnik belegt.

Zusätzlich gibt es hier Nutzerbereiche für jedes einzelne Labor. In diesen Bereichen können Geräte aufgestellt werden, die in den Laboren durch Geräuschentwicklung, Vibrationen oder Wärmeentwicklung stören würden. Durch vorhandene Wanddurchbrüche kann der Anschluss an die Labore geschaffen werden (siehe *Abbildung 5*).

Ein weiteres wichtiges Element zur Herstellung der Schwingungsfreiheit stellt der Baukörper selbst dar. So steht das HITec auf einem extra dicken Fundament, das zum Teil bis zu 100 cm stark ist. In den oberen Ebenen des Gebäudes

wird die Steifigkeit durch extra große Unterzüge sichergestellt. Diese weisen bei einer Raumhöhe von zumeist 5 Metern eine Höhe von 1,5 Metern auf.

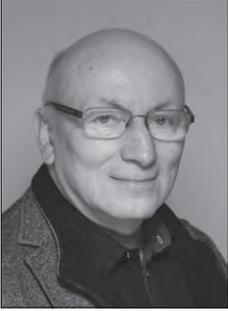
Das zweite Hauptmerkmal des HITec, die hohe Temperaturstabilität, wird durch entsprechende Klimageräte mit einer sehr ausgeklügelten Regelung erreicht. Dazu wird über eine zentrale Zuluftanlage die Außenluft zunächst aufbereitet, also auf eine Grundtemperatur gebracht und gefiltert. Diese wird im Gebäude auf einzelne Zonennachbehandlungsgeräte verteilt. Von diesen Geräten ist für jedes Labor mindestens eins vorhanden. Mit ihrer Hilfe wird die Luft aus der Zentrale auf die Anforderungen im Labor geregelt. Der gesammelten Abluft wird durch eine spezielle Vorrichtung am Ende Restenergie entzogen. Diese Energie wird für die Aufbereitung der Frischluft wiederverwendet. Auf diese Weise arbeitet das Gesamtsystem sehr effizient.

Mit Hilfe dieses hocheffizienten Systems wird eine Temperaturkonstanz von ± 1 Kelvin in den Laboren erreicht. In einigen Laboren, in denen die Anforderungen an die Temperaturstabilität noch höher sind, wird mithilfe von Laminar-Flow-Einheiten lokal über den optischen Tischen sogar

eine Temperaturkonstanz von $\pm 0,1$ Kelvin erreicht. Um eine optimale Zusammenarbeit der verschiedenen Arbeitsgruppen zu erreichen, ist ein optimaler Austausch von Daten oder Signalen sehr wichtig. Aus diesem Grund wurde das HITec mit einem Experimentiernetzwerk ausgestattet. Dieses Netzwerk besteht aus verschiedenen Datenkabeln und optischen Datenleitungen, die sternförmig von einem zentralen »Zeit-Labor« aus im Gebäude verlegt worden sind. Dadurch ist es möglich, verschiedene Labore für einen Daten- oder Signalaustausch miteinander zu verbinden. Ebenfalls können so Signale zentral für alle verteilt werden. Dazu zählen zum Beispiel ein 10 MHz- und 100 MHz-Zeitsignal zur Synchronisation verschiedener Versuche. Alle Leitungen des Experimentiernetzwerkes liegen in einem speziell geschirmten Kanal und werden aus klimatischen Gründen durch die Labore geführt.

Neben diesen speziellen Einrichtungen bietet das HITec den Forschenden eine sehr gute allgemeine infrastrukturelle Ausstattung. Dazu gehört eine ausreichende Energieversorgung, die zum Teil unterbrechungsfrei eingerichtet ist. Ebenso wird jedes Labor mit technischen Gasen (Argon; Stickstoff; Helium), Kühlwasser zur Maschinenkühlung und sehr reiner öl- und wasserfreier Druckluft versorgt.

Somit bietet das HITec den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eine ideale zukunftsichere Infrastruktur und eine optimale Umgebung zur gemeinsamen Forschung.



Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Jahrgang 1949, ist seit 1994 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Von 1997 bis 2009 war er Sprecher des SFB 407 »Quantenlimitierte Meßprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen«, von 2007 bis 2014 war er Sprecher des Exzellenz Clusters »Quantum Engineering and Space-Time Research« (QUEST). Er ist Sprecher von QUANOMET und Sprecher des HITec-Vorstands.
Kontakt: ertmer@iqo.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Tobias Frobose

Jahrgang 1979, hat 2017 am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik im Bereich der Transporttechnik promoviert. Seit Ende 2011 begleitet er die Planung und den Bau des HITecs. Sein Arbeitsschwerpunkt ist die technische Leitung des Gebäudes sowie die Begleitung der Großgeräte, darunter besonders die des Einstein-Elevators.
Kontakt: tobias.frobose@hitec.uni-hannover.de



Dr. Alexander Wanner

Jahrgang 1978, hat 2013 am Institut für Gravitationsphysik in Technischer Physik promoviert. Seit 2013 hat er als Geschäftsführer der QUEST Leibniz Forschungsschule die Planung und den Bau des HITec begleitet. Seit der Gebäudeeröffnung im Juni 2018 ist er Geschäftsführer vom HITec sowie vom Sonderforschungsbereich 1227 DQ-mat.
Kontakt: alexander.wanner@quest.uni-hannover.de

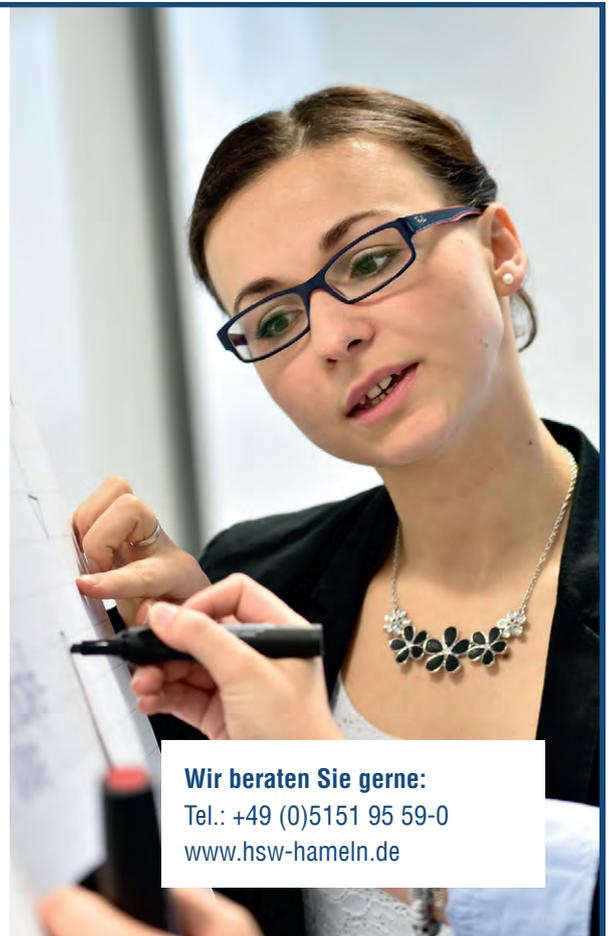


Hochschule
Weserbergland

Wir haben den Masterplan

General Management (MBA)

- › Berufsbegleitender Masterstudiengang in Hameln für zukünftige Führungskräfte aller Berufsgruppen
- › Schwerpunktsetzung in Controlling, Marketing und Vertrieb, IT-Management oder HR-Management
- › Begleitendes Einzelcoaching für jeden Studierenden
- › Integrierter Studienaufenthalt in den USA (2 Wochen)
- › Hoher Praxisbezug in allen Modulen
- › Alle drei Wochen Vorlesungen (freitagnachmittags/samstags)
- › Studienstart jährlich im September



Wir beraten Sie gerne:

Tel.: +49 (0)5151 95 59-0

www.hsw-hameln.de

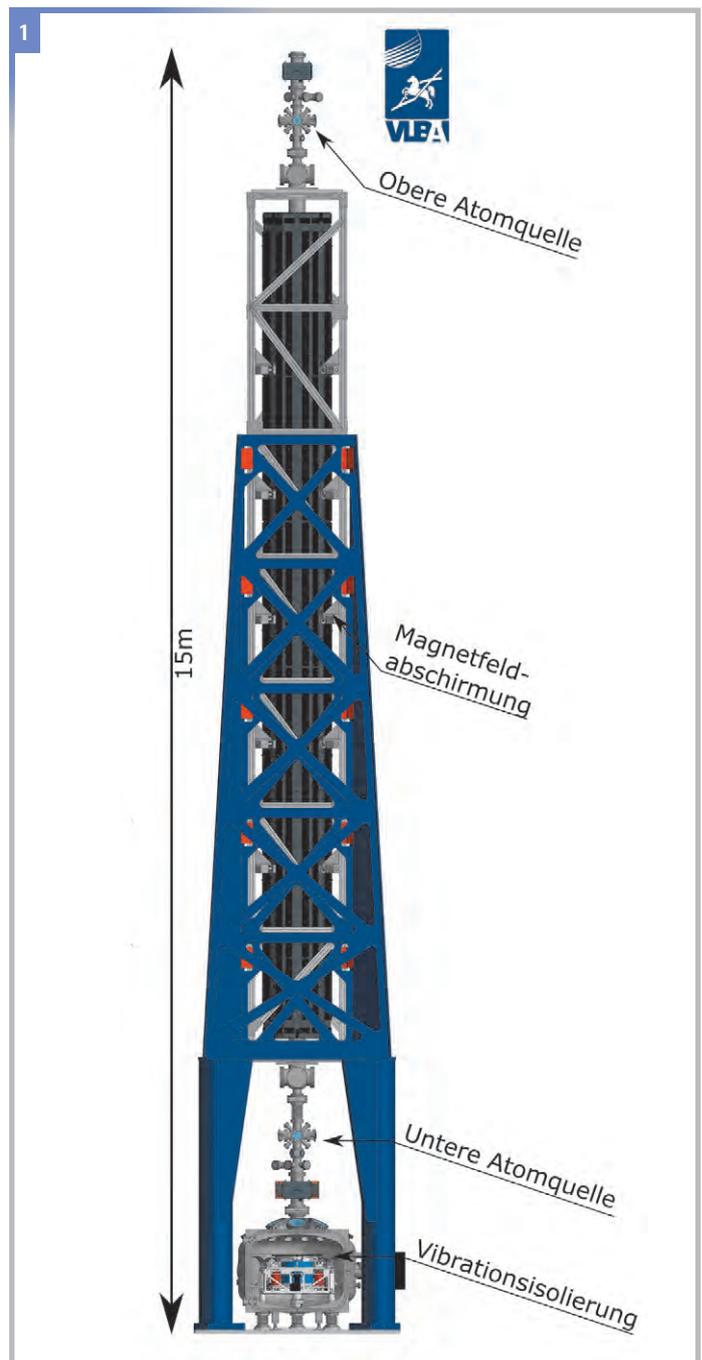
Der VLBAI-Teststand

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

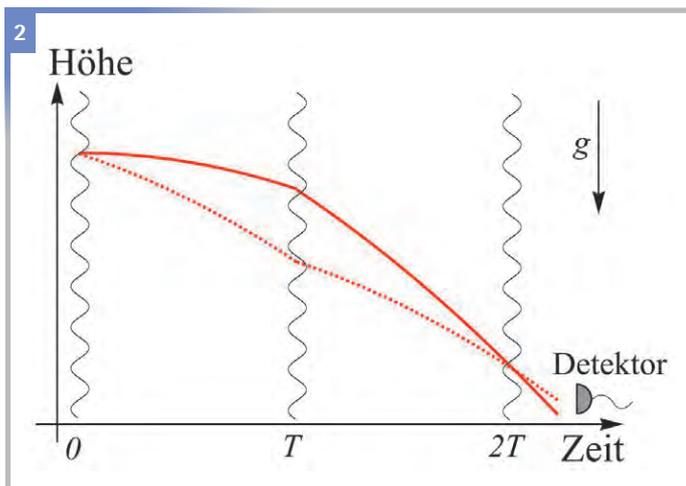


der *Very Long Baseline Atom Interferometer*-Teststand (VLBAI, siehe *Abbildung 1*) besonders viel Platz zur Verfügung: Als eines der drei zentralen Großgeräte im Forschungsbau HITec (nicht zu verwechseln mit dem separat stehenden Freifallsimulator »Einstein-Elevator«, in welchem nicht nur atomare Wellenpakete,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

Freiraum für Leistung.



Jetzt starten. Nicht warten.
Hochschul-Praktika sichern.

Mit Hochschul-Partnerschaften schaffen wir Win-Win-Situationen für Studierende, Lehrstühle, Fachbereiche und die NORD/LB als attraktiven, fairen Arbeitgeber. Mehrwerte und Grundlagen für Karriere-Chancen in unserem Haus bieten z. B. Stipendienprogramme, Hochschul-Praktika, Kooperationen mit Bachelor-/Masterthesis, Forschungsprojekte und NORD/LB Alumni. Nach Studienabschluss können **Trainee-Programme** die Möglichkeit eröffnen, erste Verantwortung in einem dynamischen, leistungsorientierten Berufsumfeld zu übernehmen.

Weitere Infos und ausgeschriebene Stellen unter: www.nordlb.de/praktikanten

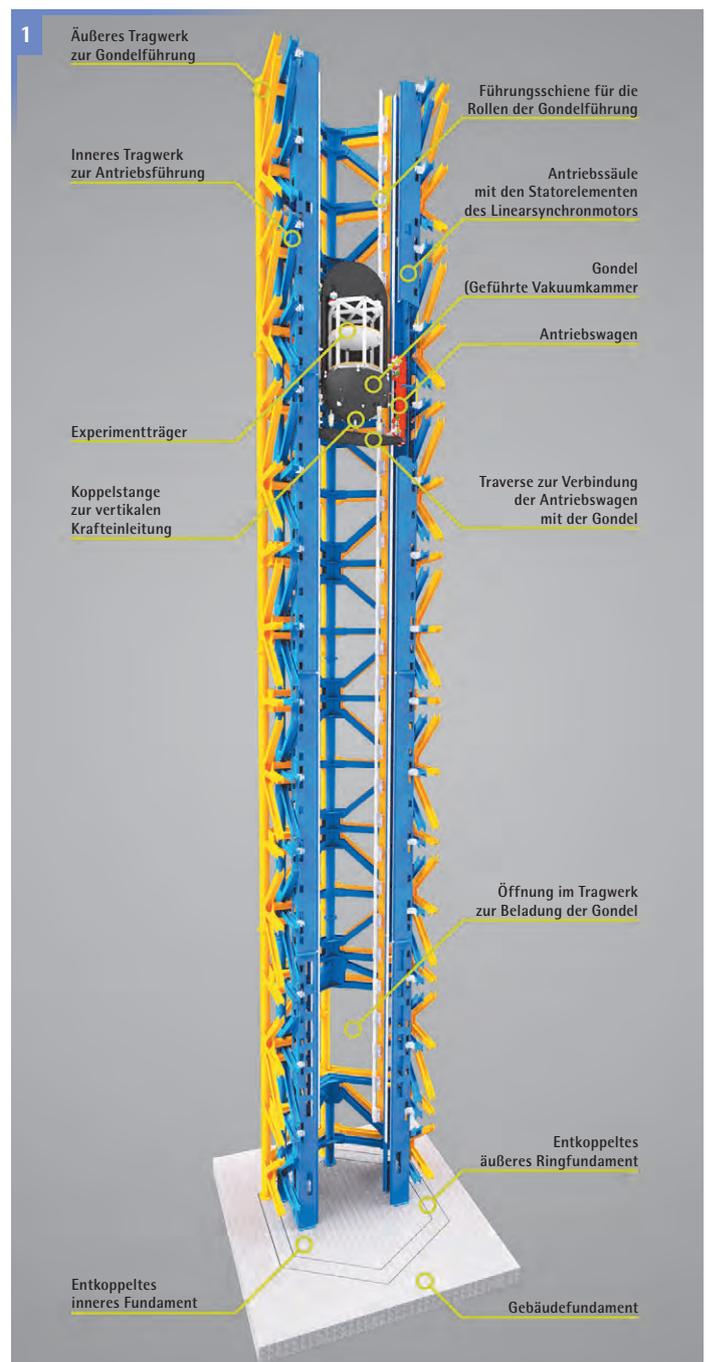
Der Einstein-Elevator

DER WELTWEIT ERSTE FALLTURM NEUER GENERATION MIT HOHER WIEDERHOLRATE

Der Einstein-Elevator ist die weltweit erste Forschungseinrichtung für physikalische und produktionstechnische Experimente bei unterschiedlichen Gravitationsbedingungen von Schwerelosigkeit bis zur fünffachen Erdbeschleunigung mit hoher Wiederholrate. Wissenschaftler vom Institut für Transport- und Automatisierungstechnik stellen die Funktionen und einzigartigen Möglichkeiten der Eigenkonstruktion vor.

Das ambitionierte Ziel in der Raumfahrt für die nächsten zwei Jahrzehnte besteht darin, eine Kolonie auf dem Mars zu errichten, zumindest wenn es nach der Vision von Elon Musk (SpaceX) geht. Für eine Kolonialisierung sind allerdings noch viele Fragen ungeklärt. Auf dem langen Flug zum Mars werden voraussichtlich metallische oder aus Kunststoff bestehende Ersatzteile benötigt. Wie werden diese in Schwerelosigkeit produziert? Mit konventionellen Werkzeugmaschinen? Im Druckverfahren? Sind die Astronauten auf dem Mars angekommen, müssen sie sich Unterkünfte errichten. Da die Nutzlast für Bauteile von der Erde begrenzt ist, sollte möglichst auf Ressourcen zurückgegriffen werden, die auf dem Planeten vorkommen. Aber wie werden aus den Mars-Rohstoffen Habitate gebaut, die dem Menschen nicht nur Schutz vor kosmischer Strahlung bieten, sondern im Inneren auch eine Atmosphäre erhält, in welcher der Mensch atmen kann?

Die Entwicklung von Methoden und Techniken für diese sehr speziellen Einsatzgebiete kann auf der Erde stattfinden. Die Erprobung unter Schwerbedingungen, wie sie beispielsweise im All oder auf dem Mars vorherrschen, kann dann in Falltürmen erfolgen. Mithilfe geeigneter Versuchsaufbauten können darin Experimente von sehr kleinen Prozessen aus der Quantenphysik



bis hin zu sehr großen Aufbauten aus dem Maschinenbau, beispielsweise zum 3D-Druck im All oder auf dem Mars, durchgeführt werden.

Das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik hat die Entwicklung einer neuartigen Anlage federführend übernommen und wurde dabei von Kollegen aus der Quantenoptik unterstützt. Vom ersten Entwurf bis hin

($\mu g = 10^{-6} g$ – hier steht g für eine Einheit/ein Vielfaches der Erdgravitation und nicht für eine Masse in Gramm), Versuchsdauer sowie Dimension und Gewicht der Nutzlast unterscheiden. Allerdings nutzen alle Falltürme das gleiche Prinzip: Das Fallenlassen eines Versuchsträgers im Vakuum, beschleunigt durch die Erdgravitation. Keiner dieser Falltürme ermöglicht es, Gravitationsbedingungen, wie sie

ge manuelle Arbeiten, ein geringerer Automatisierungsgrad und lange Pumpzeiten bei der Vakuumerzeugung. In beiden Anlagen wird das Experiment in einer druckdichten Kapsel in riesigen Vakuumkammern ungeführt fallengelassen und durch einen Behälter mit Styroporkugeln wieder abgebremst. Ein Katapult ermöglicht zudem im *Fallturm Bremen* eine Verdoppelung der Versuchsdauer von 4,7 s auf knapp 9,3 s durch einen vertikalen Parabelflug.



zur Bauüberwachung und der Entwicklung eigener Mess- und Steuerungskonzepte ist der Aufbau dieses Gerätes durch ein kleines Team von Institutsmitarbeitern in Zusammenarbeit mit den Firmen Ingenieur Büro Heinz Berlin (Planung und Konstruktion), Eilhauer Maschinenbau GmbH (Generalunternehmer für Stahlbau, Maschinenbau, Elektrotechnik), InTraSys GmbH Innovative Transportsysteme (Antriebs- bzw. Bremssystem und Regelungstechnik), Hall BV (Gondel und Traverse) und Stercom Power Solutions GmbH (SuperCap-Anlage) realisiert worden.

Einstein-Elevator versus konventionelle Falltürme

Weltweit existiert eine Vielzahl an Falltürmen, die sich in der Genauigkeit der Schwereelosigkeit/Mikrogravitation

auf dem Mond oder dem Mars auftreten, nachzustellen. Der Einstein-Elevator ist die erste Anlage weltweit, die zusätzlich zu reinen Schwerelosexperimenten die Kapsel auch gebremst fahren und somit andere Gravitationsbedingungen simulieren kann und das bei einer gleichzeitig hohen Wiederholrate, welche statistische Untersuchungen in diesen wissenschaftlichen Experimenten kosten- und zeitgünstig zulässt.

Die Wiederholrate bei konventionellen Falltürmen ist meist stark eingeschränkt. Zum Beispiel ermöglichen die beiden bekanntesten Forschungsanlagen, die *NASA Zero Gravity Research Facility* (132 m Freifallweg, 5,18 s Falldauer) und der *Fallturm Bremen* (110 m Freifallweg, 4,7 s Falldauer), nur zwei bis drei Experimente pro Tag. Gründe dafür sind unter anderem zeitaufwändi-

Falltürme der nächsten Generation

In den vergangenen zehn Jahren wurde am ZARM in Bremen, bei der NASA in Cleveland (Ohio) und in Hannover an einer neuen Falltürmgeneration gearbeitet. Treibend waren die Ziele: Erzeugung partieller Gravitation und Steigerung der Wiederholrate. Die Konzepte unterscheiden sich in ihrer Ausführung, haben aber alle gemeinsam, dass Hochleistungsantriebe sowie präzise Mess- und Regelungstechnik zum Einsatz kommen und der Automatisierungsgrad bei der Versuchsdurchführung stark gesteigert wird. Auf große Vakuumkammern wird verzichtet. Stattdessen fährt eine Kabine, welche den Experimentaufbau umgibt, von Schienen geführt auf und ab. In Bremen existiert mittlerweile ein Prototyp, die NASA wertet noch Konzeptstudien aus. Die Fertigstellung des Einstein-Elevators ist für das Wintersemester 2018/2019 geplant.

Große wissenschaftliche Experimente im vertikalen Parabelflug

Im Einstein-Elevator können große experimentelle Aufbauten untersucht werden. Diese können eine Größe von 1,7 m im Durchmesser und 2 m Höhe bei einem Gewicht von

Abbildung 1
Querschnitt durch die Konstruktion des Einstein-Elevators. Zur Schwingungsentkopplung stehen die zwei Türme (gelb und blau) auf jeweils vom Gebäude getrennten Fundamenten. Für die nötige Stabilität sorgen 10 m ins Erdreich getriebene Bohrpfähle.

Abbildung 2
Die Computeranimation vermittelt bereits einen hervorragenden Eindruck davon, wie es später im Einstein-Elevator einmal aussehen wird: Der Versuchsträger wird in der Beladeebene bei angehobenem Gondeloberteil eingebracht.



Abbildung 3
Die Gondel des Einstein-Elevators ist vollständig aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff gefertigt und hat bei einer Gesamthöhe von 4,5 m und einem Durchmesser von 2 m eine Masse von ca. 450 kg. Vor dem Einbau in den Einstein-Elevator wird die Gondel auf Vakuumdichtigkeit getestet, um später eine Vakuumqualität von mindestens 10^{-2} mbar zu gewährleisten.

Abbildung 4
Der Linear-Synchron-Motor in den zwei Antriebssäulen sorgt für die nötige Beschleunigung von maximal 5 g. Im unteren Bereich mit sechs parallelen Statorreihen für die Beschleunigung und im oberen Bereich mit zwei Statorreihen zum Ausgleich von Luft- und Rollwiderstand. Auffälliges Merkmal: Um die Turm-in-Turm-Konstruktion deutlich zu erkennen, sind der Turm für die Gondelführung in gelb (Institutsfarbe ITA) und der Turm für den Antrieb in blau (Farbe der LUH) lackiert. Alle beweglichen Komponenten wie die Antriebswagen und das Schienensystem zur Einbringung des Experimentträgers sind für einen maximalen Kontrast in rot lackiert.

bis zu 1000 kg haben. Eine druckdichte Hülle sorgt bei Bedarf für eine erdähnliche Atmosphäre im Inneren des Trägers. Außerdem können elektrische Energie, Druckluft, Kühlmittel oder Prozessgase zwischengespeichert werden.

Ein Hochleistungslinearantrieb beschleunigt die Gondel samt Experimentträger mit einem Gesamtgewicht von etwa 2,7 t auf einer Strecke von 5 m mit einer Beschleunigung von 5 g innerhalb von 0,5 s auf 20 m/s (= 72 km/h). Dazu werden 4,8 MW Antriebsleistung benötigt, die von einem Superkondensator-Energiespeicher bereitgestellt werden.

Während des vertikalen Parabelflugs kompensiert der Antrieb Luft- und Rollwiderstand entlang der 20 m langen Freifallstrecke, sodass die Gondel einer idealen vertikalen Wurfparabel folgt. Bei den Schwerelosexperimenten löst sich nach der Beschleunigungsphase im Inneren der Gondel der Experimentträger vom Gondelboden und schwebt kräftefrei für 4 s. Am Ende des Schwerelosfluges werden Experimentträger und Gondelboden wieder angenähert. Die einzelnen Antriebs Elemente werden kurzgeschlossen, sodass diese als Wirbelstrombremse arbeiten. Die Gondel wird mit bis zu 5 g wieder abgebremst. Mit der Unterstüt-

zung weiterer vier zuschaltbarer Wirbelstrombremsen wird die bewegte Masse sicher auf Hydraulikzylindern abgesetzt, die die Restgeschwindigkeit schlussendlich auf null reduzieren.

Mond, Mars, Raketenstart

Im Bereich von 0 g bis 1 g werden Mond- oder Marsgravitation nachgestellt. Dabei wird in der Beschleunigungsphase mit im Vergleich zum Schwerelos-Profil geringerer Beschleunigung gestartet, so dass die Anfangsgeschwindigkeit ebenfalls geringer ist. Entsprechend des gewünschten Profils wird anschließend in Aufwärtsrichtung zusätzlich beschleunigt und in der Abwärtsrichtung entsprechend gebremst. Die mögliche Dauer der Versuchsdurchführung hängt vom Fahrprofil ab und kann zwischen 4 s bei nahe 0 g und bis zu 12,8 s bei 0,9 g betragen. Bei den Experimenten mit partieller Gravitation bleibt der Experimentträger fest mit dem Boden der Gondel verschraubt.

Auch der Bereich von 1 g bis 5 g ist nutzbar und wissenschaftlich interessant, wenn gleich dieser nicht im Fokus liegt. Für die Entwicklung von Technik, die in Schwerelosigkeit präzise funktioniert, aber zuvor einem Raketenstart

standhalten muss, sind Tests nötig, bei denen ein schneller Wechsel in einem Sekundenbruchteil von multipler Gravitation zu partieller Gravitation oder Schwerelosigkeit erfolgen kann. Beispielsweise können im Einstein-Elevator Beschleunigungen, wie sie in Ariane 5-Raketen (maximal 4,55 g) oder Sojus-Raketen (maximal 4,30 g) auftreten, nachgestellt werden. Bei den höheren Beschleunigungen sind allerdings die Versuchszeiten stark reduziert (1,4 s bei 1,5 g bis 0,5 s bei 5 g), da hierfür lediglich der Weg der Beschleunigungsphase zur Verfügung steht.

Wiederholrate von 100 Experimenten pro 8-Stunden-Schicht

100 Experimente in einer 8-Stunden-Schicht bedeuten, dass ein Experiment alle 4 bis 5 min. gestartet wird. In der Zeit zwischen den Versuchsdurchführungen befindet sich die Gondel in der Parkposition. Diese Zeit wird genutzt, um das Experiment wieder auszurichten. Der Experimentträger wird während des freien Falls durch die Corioliskraft beeinflusst, das heißt die Erde dreht sich unter dem Experiment weiter und es landet daher nicht dort, wo es zuvor gestartet ist. Die dafür wesentliche Komponente ist ein automatisches Ausrichtsystem, welches den Experimentträger in der Gondel zentriert, ohne diese dafür öffnen zu müssen. Außerdem wird die Zeit zwischen den Versuchsdurchführungen zum Wiederaufladen des Superkondensator-Energiespeichers sowie zum Abkühlen des Antriebs genutzt. In der Parkposition werden zudem die Energiespeicher des Experimentträgers automatisch gekoppelt und nachgeladen. Darüber hinaus können die Experimentdaten über eine permanente Datenverbindung zwischen Kontrollraum und Experiment



heruntergeladen und analysiert sowie die Parameter für den nächsten Flug hochgeladen werden.

Hohe μg -Qualität

Während sich die Experimente in Schwerelosigkeit befinden, sind die Restbeschleunigungen auf das Experiment so gering wie möglich zu halten. Gerade quantenoptische Experimente benötigen eine möglichst hohe μg -Qualität (Mikrogravitation). Der angestrebte Zielwert liegt bei $< 10^{-6} g$. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Experiment beziehungsweise die Gondel und der Antrieb voneinander entkoppelt. Eine aufwändige Turm-in-Turm-Konstruktion mit separaten Fundamenten für die Türme der Antriebs- sowie der Gondelführung und einer speziellen Konstruktion zur

Kraftübertragung ermöglichen diese Entkopplung. Schwingungen aus dem Antrieb und dessen Führung werden nicht auf das sensible Experiment übertragen. Außerdem umgibt den Experimentträger im Gondelinneren ein Vakuum mit einem atmosphärischen Druck von $< 10^{-2}$ mbar, sodass auch Luftstöße und Schallwellen nicht übertragen werden. Bei der Konstruktion des Experimentträgers ist außerdem auf eine hohe Steifigkeit und ein schnelles Abklingverhalten bei Restschwingungen geachtet worden.

Die ersten Experimente stehen in den Startlöchern

Die ersten Forschungsprojekte im Einstein-Elevator werden durch das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik sowie das Institut für

Quantenoptik gemeinsam mit dem Laserzentrum Hannover e.V. aus deren Kernthemen initiiert. Darunter sind Themen wie 3D-Druck, Lasermaterialbearbeitung, Pulverhandhabung in Schwerelosigkeit, Logistik im All (zum Beispiel Material- und Bauteilhandhabung auf der Raumstation oder auf der Mond-/Marsoberfläche) sowie Abbau, Transport und Verarbeitung von Material zum Unterkunftsbaus. Darüber hinaus besteht auch der Bedarf in der physikalischen Grundlagenforschung beispielsweise an ultrakalten Quantengasen (zum Beispiel Bose-Einstein-Kondensaten) sowie deren Atominterferometrie und Materiewellenexperimenten. Hierbei können die statistischen Kampagnen aufgrund der hohen Wiederholrate erstmals in adäquater Zeit und zu deutlich geringeren Kosten als bisher durchgeführt werden.



Dipl.-Ing. Christoph Lotz

Jahrgang 1985, ist seit 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik und der QUEST Leibniz Forschungsschule. Seit November 2014 leitet er die Gruppe Transporttechnik. Sein Arbeitsschwerpunkt ist das Management des Projektes Einstein-Elevator. Kontakt: christoph.lotz@hitec.uni-hannover.de



Sebastian Lazar, B.Sc.

Jahrgang 1990, ist seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik und der QUEST Leibniz Forschungsschule. Sein Arbeitsschwerpunkt ist die elektrotechnische Betreuung des Aufbaus des Einstein-Elevators, insbesondere der Mess- und Steuerungstechnik. Kontakt: sebastian.lazar@hitec.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Jahrgang 1964, ist Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik und Wissenschaftlicher Direktor des Laser Zentrum Hannover e.V.. Seine Forschungsschwerpunkte sind unter anderem die Automatisierung von Förderanlagen und innerbetrieblichen Transportsystemen sowie die Integration innovativer Sensortechnologien in diese Anlagen, die Lasermaterialbearbeitung und die Optronik. Kontakt: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de



ZQS

Schlüsselkompetenzen



Region Hannover

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

>> Ihre Erfahrung zählt!

Sie arbeiten in führender Position in einem Unternehmen der Region Hannover? Sie haben selbst studiert und möchten Ihre beruflichen Erfahrungen gerne weitergeben?

Das freut uns! Als Mentorin/Mentor haben Sie die Möglichkeit, Studierende aus dem In- und Ausland auf ihrem persönlichen Weg in den Beruf aktiv zu begleiten. Im gegenseitigen Austausch profitieren Sie von Einblicken in die Leibniz Universität Hannover ebenso wie von neuen Kontakten zu weiteren Mentorinnen/Mentoren aus der Region.

- >> Persönliches 1:1-Mentoring
- >> Netzwerkveranstaltungen
- >> Sechsmonatige Tandemphase

Mentoring für den
Berufseinstieg
für Studierende aus
dem In- & Ausland



Wir suchen Mentorinnen/Mentoren...

- >> aus allen Branchen und Unternehmensgrößen
- >> aus Unternehmen und wirtschaftsnahen Einrichtungen
- >> aus allen Fachabteilungen
- >> mit akademischem Hintergrund
- >> mit mindestens fünf Jahren Berufserfahrung und Führungsverantwortung
- >> mit Interesse am Austausch mit Studierenden

Speziell für internationale Studierende gerne mit...

- >> Auslandserfahrungen
- >> Fremdsprachenkenntnissen
- >> Offenheit für andere Kulturen

Next Step ist eine Kooperation zwischen der ZQS/Schlüsselkompetenzen der Leibniz Universität Hannover sowie der Wirtschafts- und Beschäftigungsförderung der Region Hannover.

www.sk.uni-hannover.de/mentoring





EILHAUER – Technologie ist unsere Leidenschaft

Mehr als 80 Jahre ist Eilhauer Maschinenbau kompetenter Partner der Industrie mit individuellen technischen Lösungen im Maschinen- und Sondermaschinenbau.

Eilhauer Maschinenbau GmbH / Am Pferdemarkt 53 / D-30853 Langenhagen / Tel.: +49 (0) 511 9 73 60-0 / Fax: +49 (0) 511 9 73 60-30 / info@eilhauer.de / www.eilhauer.de

STERCOM POWER SOLUTIONS GMBH ist Ihr Ansprechpartner für kundenspezifische Energiespeichersysteme bei hohen Ansprüchen an Leistung, Lebensdauer und Umweltbedingungen

WIR SIND IMMER AUF DER SUCHE NACH VIELVERSPRECHENDEN NACHWUCHSKRÄFTEN

Ziegelstraße 1 / 83629 Weyarn / Tel.: +49 (0)8020 9086680 / info@stercom.de / www.stercom.de



Stercom Power Solutions GmbH
Energy Storage Systems



We Support You
To **Succeed**



Apply for the **EO Educational Award** and win up to **7.000 €** (in EO products).



Get the **Products** you need and receive up to **10% discount**. Also check out our StartUp program!



More than **30.000 Products** including Laser Optics, Imaging Lenses, Precision Optical Components and more.



We offer great **Technical Support** in **6 languages** and have a world-class online shop & catalog.

THE FUTURE DEPENDS ON OPTICS



www.edmundoptics.eu/university | facebook.com/edmundoptics
+49 (0) 6131 5700-0 | sales@edmundoptics.eu



Wir suchen dich!

Du studierst Wirtschaftsingenieurwesen, Maschinenbau, Mathematik oder Informatik und hast den Abschluss bald in der Tasche?

Du suchst einen Job in Hannover und hast Lust, praxisnah zu forschen?

Dann bewirb dich bei uns:
www.iph-hannover.de



**CAREER DATES
MAY 2019**

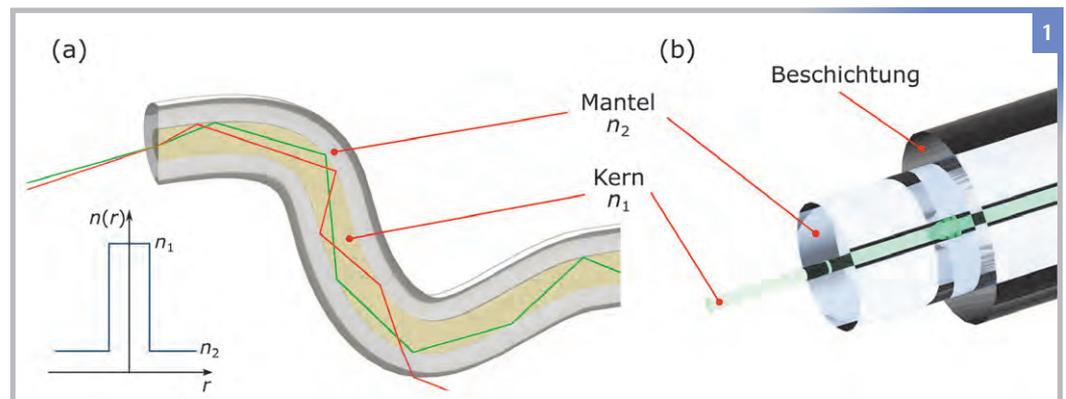
| Produktion erforschen und entwickeln |

Mehr als nur Lichtleitung

INNOVATIVE GLASFASERHERSTELLUNG AM HITEC

In den Laboratorien des HITEc-Gebäudes können aufgrund der technischen Ausstattung in Zukunft neuartige, laseraktive und strahlungsharte Fasern realisiert werden.

Wissenschaftler vom Institut für Quantenoptik und vom Laser Zentrum Hannover e.V. berichten über die Verbindung der klassischen Forschung an laseraktiven Glasfasern mit Weltraumanwendungen. Ziel dabei ist es, ein Forschungszentrum für die Herstellung von Spezialfasern zu etablieren.



Optische Glasfasern oder Lichtwellenleiter sind aus vielen Bereichen unseres Alltags nicht mehr wegzudenken: In komplexen medizinischen Anwendungen werden Glasfasern zum Beispiel bei der Endoskopie eingesetzt. Auch in der modernen industriellen Produktion, vor allem der Lasermaterialbearbeitung sind optische Fasern in der Strahlführung oder als Strahlquelle bereits etabliert. Ebenso werden in der Sensorik mehr und mehr Konzepte auf der Basis von Glasfasern entwickelt. Der Begriff Lichtwellenleiter wird aber heute überwiegend assoziiert mit der modernen optischen Datenübertragung über Glasfaserkabel und ihrer enormen Kapazität, die im Zeitalter des Hochgeschwindigkeits-Internets den gesamten Globus umspannt. Heutzutage lassen sich mittels modernster Multiplexverfahren Signalübertragungsraten von bis zu 10^{14} bit/s pro Faser erreichen.

Die Lichtleitung in optischen Fasern beruht auf dem Effekt der Totalreflexion, der an der Grenzfläche zwischen einem optisch dichteren hin zum optisch dünneren Medium auftritt (s. Infokasten 1): Ein innerer hochbrechender Faserkern (n_1) ist umgeben von einem niedrigbrechenden Mantel ($n_1 > n_2$). Die Brechungsindexvariation innerhalb einer solchen Glasfaser wird dabei durch die Verwendung unterschiedlicher Fremdatome, sogenannter Dotanden, im Kern und im Mantel erreicht. Der so ausgebildete Wellenleiter ermöglicht eine nahezu verlustfreie Führung optischer Strahlung über hunderte von Kilometern. Glasfasern können mittlerweile aber viel mehr, als nur eine reine Lichtleitung: Durch eine Dotierung des Faserkerns mit seltenen Erden, wie zum Beispiel Ytterbium, kann eine Verstärkung von Licht bis hin zur Laseraktivität erreicht werden. Moderne Faserlasersysteme lie-

Abbildung/Infokasten 1

- (a) Verteilung des Brechungsindex in einer optischen Glasfaser. Ein innerer, hochbrechender Faserkern mit Brechungsindex n_1 ist umgeben von einem niedrigbrechenden Mantel mit $n_1 > n_2$. Die Brechungsindexvariation innerhalb der Glasfaser wird dabei durch den Einsatz unterschiedlicher Fremdatome, sogenannter Dotanden, im Kern und im Mantel erreicht und führt zu einer Lichtleitung innerhalb des Faserkerns. Unterhalb eines kritischen Akzeptanzwinkels der einfallenden Lichtstrahlen in die Faser werden diese im Faserkern geführt, wobei die lokale Krümmung des Wellenleiters an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel eine Rolle spielt.
- (b) Aufbau einer optischen Glasfaser. Der aus Glas bestehende Kern bzw. der Mantel werden zum mechanischen Schutz mit einem Schutzmantel aus mehreren Polymerschichten überzogen.

gen auf einem Leistungsniveau von über 100 kW und finden vielfältige Verwendung in Forschung und Industrie.

Die Aktivitäten der Forschungsgruppe »Integrierte Photonik« am HITec fügen sich in diesen innovativen Themenkomplex der modernen Fasertechnologie ein. Im Vordergrund sollen dabei aber nicht neue Rekorde für Hochleistungsfaserlaser stehen, son-

zum Beispiel maßgeschneiderte faserbasierte Strahlquellen für neuartige Sensorkonzepte, erarbeitet werden. Die Fasertechnologie am HITec soll hier den Status einer zentralen Enabling-Technologie einnehmen.

Der Prozess der Herstellung einer Glasfaser umfasst folgende Schritte: Ausgehend von einem Anforderungsprofil wird zunächst ein Faserdesign erarbeitet, das neben der

ckelt wird. Aus einer einzigen Preform können auf diese Weise viele Kilometer Glasfaser kontinuierlich gezogen werden. Die gesamte Herstellungskette wird von einer umfassenden optischen und mechanischen Charakterisierung begleitet, um die komplexe Prozessführung zu kontrollieren.

Am HITec-Gebäude werden diese Fertigungsschritte gegenwärtig mit der Einrichtung von modernsten Anlagen umgesetzt. Für die Preformherstellung steht ein spezielles Labor zur Verfügung, das auf einer Fläche von etwa 80 m² alle notwendigen Apparaturen in Reinraumumgebung beherbergt. Kernstück des Labors ist eine Glasdrehbank, die mit einer Anordnung von Wasserstoff/Sauerstoff-Brennern und einer komplexen Gaszufuhreinheit ausgestattet ist (siehe Abbildung 2). Die Preformherstellung erfolgt mittels des *Modified Chemical Vapor Deposition* (MCVD)-Verfahrens. Dafür wird die Drehbank mit einem speziellen Glasrohr bestückt, das als Flussreaktor dient und den späteren Mantel in der Faserarchitektur bildet. Die Reaktanden werden in Form flüchtiger Verbindungen eingesetzt, in die Gasphase überführt und in das Glasrohr eingeleitet. (siehe Abbildung 3) Die Reaktandgasmischung enthält vornehmlich das äußerst korrosive Siliziumtetrachlorid (SiCl₄) sowie hochreinen Sauerstoff (O₂), die anschließend thermisch durch den travertierenden Brenner zur Reaktion gebracht werden. Bei der Reaktion bildet sich feiner Ruß aus amorphen Glaspartikeln (SiO₂), die sich in der Folge auf der Innenwand des Glasrohres abscheiden. So wird im Prozess, unter kontinuierlicher Rotation des Glasrohres, schichtweise die Preform aufgebaut – beginnend vom äußeren Mantel hin zum späteren Kern. Durch Ände-



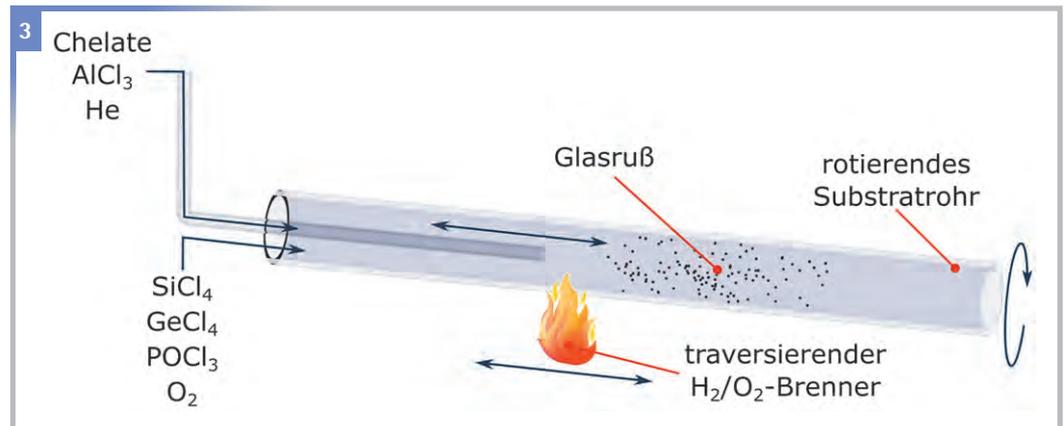
Abbildung 2
Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD)-Anlage mit einer Glasdrehbank im Zentrum. Die Prozesssteuerung erfolgt mittels eines zentralen Systems, das neben der Zusammensetzung des Reaktionsgemischs auch die Traversen des Brenners steuert.
(Quelle: Lumentum)

dern vielmehr die Realisierung von neuartigen laseraktiven und strahlungsharten Fasern. Diese Spezialfasern sollen in der Entwicklung von hochstabilen Strahlquellen sowie in diversen Experimenten im Bereich der Grundlagenforschung eingesetzt werden, wobei strahlungsharte Fasern deren Einsatz im Weltraum ermöglichen sollen. Durch die bestehende Forschungslinie Quano met der Wissenschaftsallianz der Technischen Universität Braunschweig und der Leibniz Universität sowie der EFRE-Kooperation LaPOF soll in Zukunft eine Expertise für Fasertechnologie am Standort Hannover ausgebildet werden. Ziel ist es, ein Forschungszentrum für die Herstellung von Spezialfasern zu etablieren. Neben eigener Forschung zur Optimierung und Analytik von laseraktiven und strahlungsharten Fasern sollen für andere mit dem HITec assoziierte Forschungseinrichtungen spezifische Problemlösungen, wie

Geometrie der Faser auch ein entsprechendes Dotierungsprofil vorgibt und das die diversen optischen Eigenschaften der Faser bestimmt. Dieses Faserdesign bildet die Grundlage für die Erzeugung einer Faserpreform – einem Glasstab mit einem Durchmesser von 10 bis zu 50 mm und einer Länge bis über einem Meter. Die Preform entspricht bezüglich der Materialfolge und des Brechwertprofils einer vergrößerten Version der späteren Faser und definiert damit weitgehend deren spätere optische Eigenschaften. Die eigentliche Faser wird schließlich in einem Faserziehturm hergestellt. Dafür wird die Preform unter präzise kontrollierten Bedingungen lokal aufgeschmolzen und unter konstantem Zug zur Faser ausgezogen. Gleichzeitig erfolgt eine zusätzliche Ummantelung der empfindlichen Glasoberfläche zum mechanischen und chemischen Schutz, bevor die Faser schließlich aufgewi-

Abbildung 3

Schematische Darstellung des Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD)-Verfahrens: Flüchtige Vorstufen der Glasbildner und Dotanden, vornehmlich Siliziumtetrachlorid (SiCl_4) sowie Aluminiumchlorid (AlCl_3), Germaniumtetrachlorid (GeCl_4) und Phosphoroxychlorid (POCl_3), werden mittels Trägergasen (Sauerstoff (O_2) und Helium (He)) in ein Substratrohr eingeleitet und dort thermisch zur Reaktion gebracht. Entstehender Glas-Ruß scheidet sich in der Folge schichtweise innerhalb des Glasrohres ab. Der Aufbau der Faserpreform erfolgt vom Mantel hin zum Faserkern. Eine Laseraktivität der Fasern kann durch weiteren Zusatz flüchtiger Seltenerdchelate in die Reaktandgasmischung erreicht werden. Durch Variation der Reaktandgasmischung zwischen einzelnen Abscheidungszyklen lässt sich eine graduelle Änderung des Brechungsindexes innerhalb der Preform einstellen.



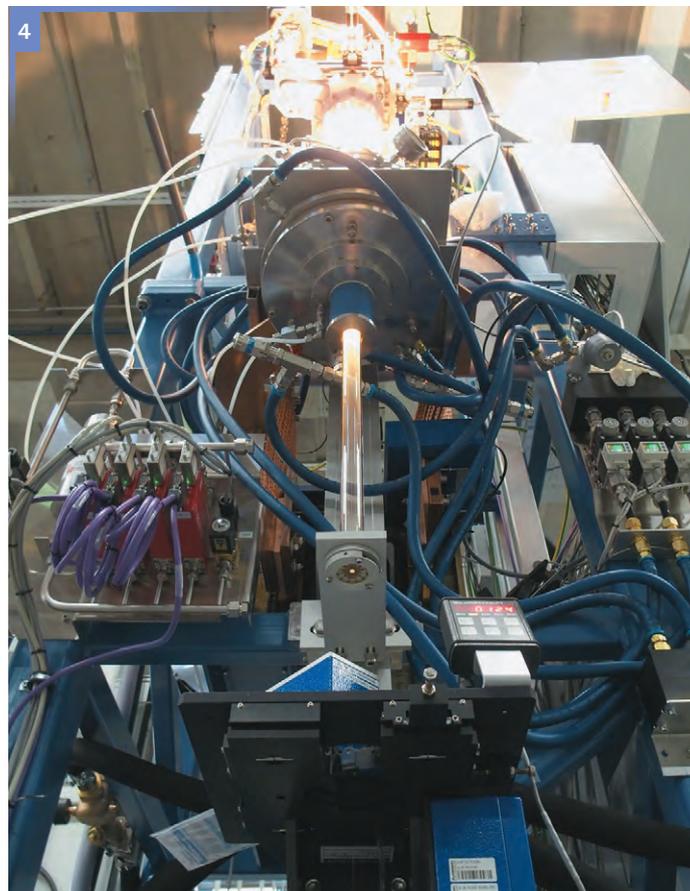
Die Einstellung der Reaktandgasmischung bei jeder Brennertraverse kann eine quasi kontinuierliche Variation der radialen Dotandenkonzentration erreicht werden. Typische Dotanden zur Steigerung des Brechungsindexes sind dabei Germanium (Ge), Phosphor (P) und Aluminium (Al), während Bor (B) und Fluor (F) den Brechungsindex des Glases verringern. In gleicher Weise

kann eine Dotierung des Kerns mit laseraktiven Materialien erfolgen, wobei relativ komplexe metallorganische Verbindungen dem Gemisch zugefügt werden müssen. Die Dotierung erfolgt dabei als Gasphasenprozess simultan zur Bildung der Glaspartikel, wodurch sehr homogene Dotandenverteilungen im Material erreicht werden. Nach Abschluss des MCVD-Prozesses

befindet sich im Mantelrohr ein relativ poröses Gefüge aus Quarz-Ruß, vergleichbar mit einem Schwamm. Die große Oberfläche kann in der Folge dazu genutzt werden, weitere Dotanden darauf zu binden und mittels eines anschließenden Sinterprozesses in der Glasmatrix zu fixieren. Prozessbedingt verbleibt im Zentrum des Glasrohres ein kleiner offener Kanal, der abschließend bei Temperaturen von etwa 2000 °C durch die Oberflächenspannung des verflüssigten Glases kollabiert, woraufhin sich ein kompakter Glasstab bildet.

Abbildung 4

Preformhalterung und Graphitofen eines Faserziehturms. Die eingespannte Preform wird zunächst lokal auf Temperaturen bis zu 2200 °C erhitzt, sodass das Glas verflüssigt wird. Die Prozessparameter werden dabei so eingestellt, dass ein Glasfaden mit definiertem Durchmesser gezogen werden kann. (Quelle: Rosendahl Nextrom)



Nach einer eingehenden Inspektion und Charakterisierung der Preform bezüglich der erreichten optischen Eigenschaften und der Konfektionierung erfolgt dann die Übergabe an den Faserziehturm. Im HITEC-Gebäude ist in einem Reinraum ein Faserziehturm mit einer Höhe von 12 m installiert, der mit allen Komponenten zur Herstellung komplexer Fasergeometrien ausgestattet ist. Dem Herstellungsprozess folgend wird die Preform zunächst in die Haltevorrichtung des Ziehturms eingesetzt und dann am unteren Ende mit einem Graphitofen lokal auf Temperaturen bis zu 2200 °C erhitzt (siehe Abbildung 4). Das Glas wird hierbei verflüssigt, ist allerdings noch immer hochviskos. Die bereits in der Preform ein-

gestellte Dotandenverteilung bleibt unter definierten Prozessbedingungen vollständig erhalten. Unter konstanter Regelung der Temperatur entsteht zunächst ein Tropfen an der Preform, welcher der Gravitation folgend abtropft und einen entsprechenden Glasfaden nach sich zieht. Wenn der Tropfen aufgefangen und der entstandene Faden kontinuierlich bei permanenter Kontrolle seines Durchmessers gefördert wird, entsteht die Lichtleitfaser mit einem der Preform analogen Dotierungsprofil und den korrelierten optischen Eigenschaften. So können aus einer einzelnen Preform (Länge ca. 1,5 m, Durchmesser ca. 5 cm) bis zu 200 km Faser innerhalb eines Arbeitstages ausgezogen werden, was einer maximalen Fördergeschwindigkeit von etwa 400 m Faser in der Minute entspricht.

Aufgrund der geringen Dicke kühlt die empfindliche Glasfaser bereits nach wenigen Metern Entfernung zum Graphitofen ausreichend ab (typische Faserdurchmesser liegen beispielsweise bei 125 μm). Im weiteren Verlauf des Zugprozesses kann die Glasfaser mit verschiedenen Polymeren beschichtet werden. Das sogenannte Coating dient der mechanischen Stabilisierung der Faser und wird im letzten Teil des Ziehturms ausgehärtet, bevor die Glasfaser auf ihre Bruchstabilität geprüft und auf eine Spuleneinheit gewickelt wird.

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der eingerichteten Labore ist die Verbindung der klassischen Forschung an laseraktiven Glasfasern mit Weltraumanwendungen, den Quantentechnologien und insbeson-

dere auch mit der Quantensorik, die im wissenschaftlichen Konzept des HITec-Gebäudes und in den kooperierenden Instituten eine herausragende Rolle spielt. Weitere Aspekte, die das besondere Potenzial der Einrichtung widerspiegeln, sind die umfangreichen, flexiblen Möglichkeiten zur Dotierung und komplexen Co-Dotierung der Fasern mit verschiedenen Elementen und sogar Nanopartikeln. Mit der neuen Fertigungskette für Glasfasern im HITec-Gebäude werden herausragende technische Möglichkeiten für die Erforschung neuartiger Konzepte für optische Glasfasern geschaffen, die für die weitere Entwicklung der Lasertechnik und insbesondere deren Anwendungen wichtige Impulse setzen können.



Prof. Dr. Detlev Ristau

Jahrgang 1957, ist Professor am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover und arbeitet seit über 30 Jahren in der optischen Dünnschichttechnologie. Seine Forschungsschwerpunkte sind unter anderem die Entwicklung und präzise Kontrolle moderner Ionenprozesse für die Fertigung hochwertiger und stabiler optischer Schichten.
Kontakt: d.ristau@lzh.de



Dr. Axel Rühl

Jahrgang 1975, leitet die Quantometer Arbeitsgruppe »Integrierte Photonik« am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen beinhalten neben Fasertechnologie und Laserentwicklung mit einem Schwerpunkt auf Faserlasersysteme auch Präzisionspektroskopie und Frequenzmetrologie.
Kontakt: ruehl@iqo.uni-hannover.de



Dr. Matthias Ließmann

Jahrgang 1982, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Quantenoptik und seit 2012 in die Planungen der Aktivitäten der Faserherstellung am HITec eingebunden. Sein Forschungsschwerpunkt umfasst die Charakterisierung optischer Komponenten.
Kontakt: liesmann@iqo.uni-hannover.de

Das HITec als Herzstück

GEODÄSIE UND QUANTENPHYSIK VERBINDEN SICH

Das HITec ist für die Wissenschaft der Geodäsie und der Physik eine weltweit einzigartige Laborumgebung. Dort soll durch die Simulation verschiedenster Umweltbedingungen die Entwicklung von Multi-Sensor-Systemen (MSS) der nächsten Generation praktisch realisiert werden. Forscherteams vom Institut für Erdmessung (IfE) und dem Geodätischen Institut Hannover (GIH) berichten.

Einleitung

Die Physik und die Geometrie unserer Erde, ihre Strukturen und ihre Umwelt verändern sich aufgrund klimatischer Variationen und menschlicher Eingriffe laufend. Das können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Geodäsie anhand geometrischer und gravimetrischer Messungen beweisen. Bei der Überwachung dieser Prozesse spielen hochpräzise Sensoren eine wesentliche Rolle. So unterliegt die Qualität der erhobenen Daten zur Beobachtung von Umweltprozessen dabei einem steten Wandel zwischen Präzision der Fertigung, Auflösungskapazität der verwendeten Korrekturmodelle und deren kontinuierliche Entwicklung sowie Umsetzung von Kalibrier- und Prüfverfahren zur nachweisbaren Sicherung der Qualität geodätischer Messinstrumente. Das HITec bietet für ingenieurgeodätische und geowissenschaftliche Anwendungen eine weltweit einmalige Laborumgebung, die sich durch fachliche Nähe zu den Nachbardisziplinen einerseits und idealen, technischen Bedingungen andererseits auszeichnet.

Gravimetrie

Die Anziehungskraft der Erde unterscheidet sich von Ort zu Ort aufgrund von Massenunterschieden in und auf der Erde und aufgrund von Höhenänderungen der Erdoberfläche. Mit



einem transportablen Freifall-Absolutgravimeter wird die Erdschwerebeschleunigung auf ausgewählten Punkten gemessen (Abbildung 1) und dann mithilfe von handlichen Relativgravimetern um viele Punkte in der freien Natur ergänzt. Die Gravimetrie ist seit den 1960er Jahren eine Spezialdisziplin am Institut für Erdmessung. Während eines Freifall-Experiments wird eine Testmasse entlang eines Laserstrahls im Hochvakuum fallengelassen, um dabei zurückgelegte Fallzeiten und Falldistanzen mit der Genauigkeit eines Bruchteils einer Nanosekunde und eines Nanometers zu messen. Als Untergrund eignet sich am besten gewachsener Felsen oder eine feste, vibrationsisolierte Betonfläche. Mit Relativgravimetern werden Schweredifferenzen zwischen zwei Punkten bestimmt. Bei diesen hochkom-

plizierten Federwaagen erfährt die Testmasse am Ende einer Feder eine veränderte Anziehungskraft durch die umgebenen Massen. Dies bedingt eine Längenänderung der Feder und beschreibt nach Anbringen einer Kalibrierung eine Schweredifferenz. Während absolute Schwerebeschleunigungen mit 10 Stellen gemessen werden ($g=9.812\ 629\ 354\ \text{m/s}^2$, Gravimetrielabor), sind beobachtete Differenzen zu benachbarten Punkten deutlich kleinere Werte mit zum Beispiel 4 oder 5 Stellen.

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) und Navigation

Seit den frühen 1970-Jahren arbeitet das Institut für Erdmessung zusätzlich im Forschungsschwerpunkt Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) und Navigation. Die

aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Nutzung von Atomuhren zur verbesserten Navigation mit GNSS, die Positionsbestimmung von niedrigfliegenden Satelliten, die Überwachung von Bodensenkungen mittels GNSS oder die Entwicklung von Konzepten zur kollaborativen Positionierung und Integritätsicherung (unter anderem benötigt für das hochautomatisierte Fahren) sowie die Antennenkalibrierung.

Standard definiert. Das Institut zählt weltweit zu den vier seitens des Internationalen GNSS Service anerkannten Institutionen zur Kalibrierung von GNSS-Antennen.

Durch die Kombination verschiedener globaler Navigationssysteme (zum Beispiel GPS (USA), GLONASS (russ.), Galileo (eur.), Beidou (chin.)) und aufgrund neuer Frequenzen und Signale werden neue

Systeme, wie auch Abweichungen, die durch die Kombination auftreten, konsistent beschrieben und berücksichtigt werden, wie zum Beispiel bei der Navigation in städtischen Häuserschluchten, präzisen Landeanflügen, der Positionierung in aktiven Referenznetzen, der kollaborativen Navigation oder der präzisen GNSS-Zeit- und Frequenzübertragung.

Ingenieurgeodäsie Multi-Sensor-Systeme der nächsten Generation

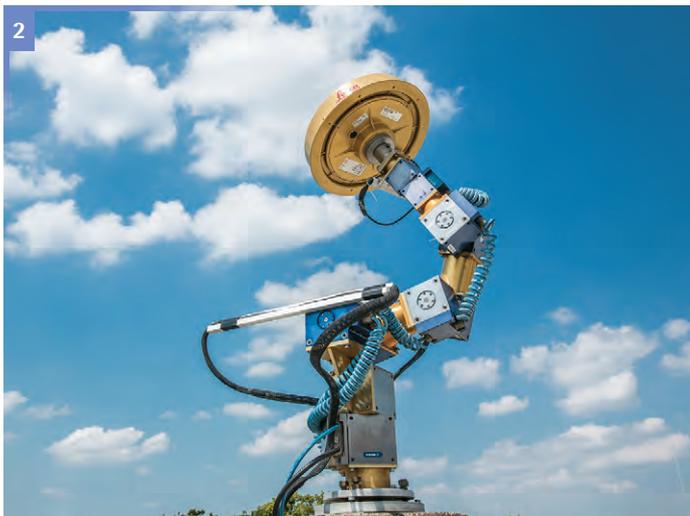
Das Geodätische Institut Hannover (GIH) forscht seit mehr als zehn Jahren im Bereich der Multi-Sensor-Systeme (MSS) und deren Einsatz für die geometrische Umwelterfassung (zum Beispiel Monitoring und Deformationsmessung natürlicher und anthropogener Strukturen). Hierbei sind die zu überwachenden Objekte in ihrer dreidimensionalen Geometrie zu diskreten Zeitpunkten möglichst detailgetreu und effizient zu erfassen. Insbesondere das kontinuierliche, zeitliche Verhalten soll über Jahre und Monate hinweg bis zu Stunden und Bruchteilen von Sekunden hin beschrieben werden. Ein MSS (Abbildung 3) besteht im Wesentlichen aus objekterfassenden Sensoren (zum Beispiel Laserscanner, Kamera) und referenzierenden Sensoren (zum Beispiel Tachymeter, Lasertracker, Navigationssensoren). Die objekterfassenden Sensorkomponenten der MSS liefern aktuell hohe Genauigkeiten (von Submillimeter bis hundertstel Millimeter) und Datenraten von bis zu mehreren Millionen von Punkten pro Sekunde.

Der Einsatz der Systeme unter realen Umweltbedingungen erfordert zwingend eine Berücksichtigung der atmosphärischen Parameter und anderen Einflussgrößen bei der Modellierung des gesamten

Abbildung 1
Das Absolutgravimeter FG5X-220 der Leibniz Universität Hannover bei Messungen in der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Abbildung 2
AMTEC/Schunk-Roboterarm für die GNSS-Antennenkalibrierung in Echtzeit.

Abbildung 3
Hochgenaue, kinematische Vermessung von Kranbahngleisen, Oben: Sensoren auf Messschlitten, Unten: Verfolgung des Messschlittens mit Lasertracker.



Hierzu ist die Beschreibung des Fehlerhaushaltes auf mm-Niveau notwendig. Zusammen mit der Firma Geo++[®] aus Garbsen wurde ein roboterassistiertes Echtzeit-Kalibrierverfahren für GPS-Antennen entwickelt (vgl. Abbildung 2), das aktuell den internationalen

Anwendungsfelder erschlossen, die zusätzlich die Qualität der Positionierung (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Integrität, Verfügbarkeit) bei bestehenden Applikationen deutlich steigern werden. Voraussetzung ist, dass der Fehlerhaushalt jedes einzel-

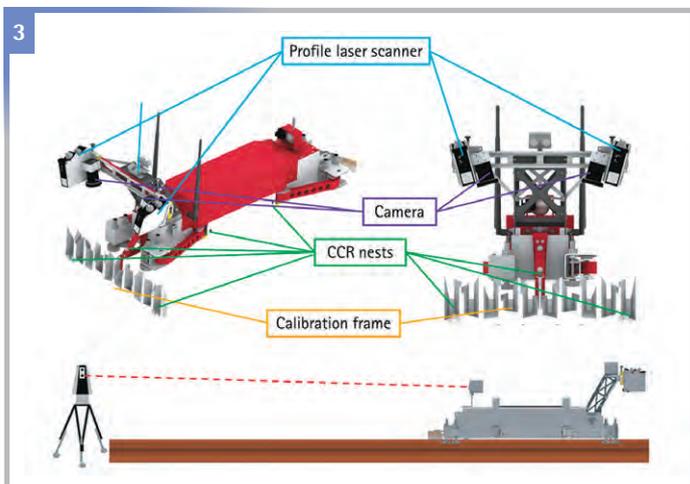
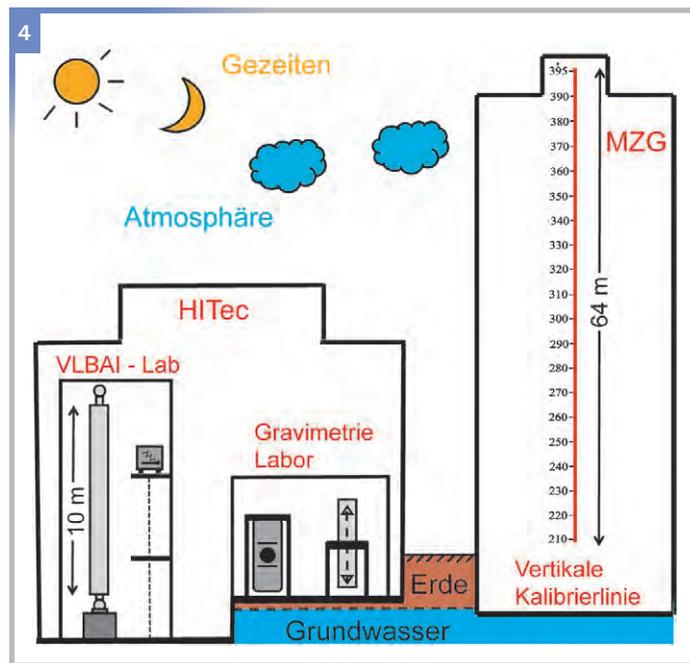


Abbildung 4
Das HiTEC mit dem neuen Gravimetrie-Messlabor und dem »Very Long Baseline Atom Interferometer« in direkter Nachbarschaft zur vertikalen Gravimeter-Kalibrierlinie. Massenbewegungen aufgrund von Gezeiten, Luftmassenvariationen und Grundwasserstandsänderungen sind signifikante Messgrößen.



Baseline Atom Interferometer (VLBAI, vgl. Abbildung 4) behoben sein: Mithilfe des freien Falls von Quanten über eine 10 m Vertikaldistanz wird das VLBAI die gewünschten Referenzwerte bestimmen. Unterstützt werden von Relativgravimetern die Auswirkungen der lokalen hydrologischen Änderungen im Erdreich auf die einzelnen Stockwerke und die Wirkung von Gezeiten, Atmosphäre und Bodenhydrologie im HiTEC Gravimetrielabor gemessen.

Eine sehr genaue Kalibrierung der Relativgravimeter ist notwendig und wird im MZG-Hochhaus der LUH bestimmt, wo ein Gerät aufgrund des großen Höhenunterschiedes und der Fahrstühle äußerst effektiv und präzise kalibriert werden kann.

Messprozesses der MSS. Neben atmosphärischen Parametern spielt auch die Synchronisation individueller Sensoren eine entscheidende Rolle. Für die korrekte Messwertzuordnung ist eine von der jeweiligen Messfrequenz und Bewegungscharakteristik abhängige Synchronisationsgenauigkeit sicherzustellen, die in den Bereich von wenigen Milli- und gar Mikrosekunden geht. Bisher ist eine echte Validierung und reale Simulation der Einflussgrößen nicht möglich – eine Herausforderung die im Rahmen von HiTEC weltweit einmalig angegangen wird.

HiTEC: Das Herzstück verbindet Geodäsie und Physik

Mit dem HiTEC wird das bisherige Gravimeter-Kalibriersystem grundlegend erweitert, um zusätzlich zur Kalibrierung von Relativgravimetern auch das Messniveau von transportablen Absolutgravimetern überprüfen zu können. Der Absolutschwerewert an einem Messpunkt ändert sich kontinuierlich aufgrund der Gezeiten, der Atmosphäre und der Hydrologie. Ein Absolutgravimeter mit einer höheren Genauigkeit existiert bisher nicht. Dieser Mangel wird zukünftig mit dem *Very Long*

Portable Absolutgravimeter (Probanden) sollten im Gravimetrielabor immer den gleichen Offset zur VLBAI-Auswertung aufzeigen, was die Langzeitwiederholbarkeit kontrolliert. Dies ist für die Umweltforschung wichtig, damit gemessene zeitliche Änderungen nicht durch variierende Mess-Offsets der Absolutgravimeter verfälscht werden.

Für den Bereich GNSS und Navigation steht ein Aussenraumlabor auf dem Dach des HiTEC mit drei präzise bestimmten Messpeilern zur Verfügung. Zusätzlich besteht eine direkte Anbindung an ein temperaturstabiles GNSS-Labor mit einem stabilen Referenzfrequenzsignal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Dies ermöglicht eine engere Kooperation zur Kalibrierung von GNSS-Empfängern. Wichtige Parameter wie Signal-, Frequenz- und System-Biases für GNSS-Ausrüstungen sind somit unter kontrollierten Bedingungen verifizierbar.

Abbildung 5
Neu installierte GNSS-Referenzstation am HiTEC auf dem Dach des Einstein-Elevators.



Auf dem Dach des Einstein-Elevators ist eine GNSS-Referenz-

station installiert (Abbildung 5), die in regionalen und internationalen Systemen eingebunden ist und das Gebäude mit GNSS Zeitsignalen versorgt.

Für die Ingenieurgeodäsie entsteht eine weltweit einzigartige Laborumgebung, mit der Simulationen verschiedenster Umweltbedingungen für die Entwicklung der MSS der nächsten Generation nun praktisch realisiert werden können. Modulare Flächenheizelemente, verteilt

über eine Raumhöhe von etwa 5 Metern, erlauben die Prüfung und Verifizierung atmosphärischer Einflüsse auf Messungen von Laserscanner und Lasertracker. Eine geometrische Referenz wird durch ein hochgenaues 3D-Referenznetz mit den schwingungsstabilen Messorten im Labor realisiert. Für die Forschung im Bereich der Synchronisation durch externe Zeitsignale stehen verschiedene Zeitreferenzen (unter anderem aus dem GNSS-Labor des IfE)

zur Validierung im gesamten Laborgebäude zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten dienen der Optimierung und Beurteilung der zukünftigen MSS-Entwicklung in Zusammenarbeit zwischen der Geodäsie und Physik.

Diese unvergleichbare Konzentration verschiedener Expertisen schafft optimale Voraussetzungen für die Bearbeitung interdisziplinärer, komplexer Fragestellungen.

IfE, Arbeitsgruppe terrestrische Gravimetrie:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller
Jahrgang 1962, ist Direktor des Instituts für Erdmessung.

Dr.-Ing. Ludger Timmen
Jahrgang 1962, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung mit Schwerpunkt Terrestrische Gravimetrie in Forschung und Lehre. Kontakt: timmen@ife.uni-hannover.de

M.Sc. Manuel Schilling
Jahrgang 1977, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung.



IfE, Arbeitsgruppe Navigation und Positionierung:

Dr.-Ing. Tobias Kersten
Jahrgang 1982, ist wissenschaftlicher Koordinator am Institut für Erdmessung mit dem Forschungsschwerpunkt GPS/GNSS-Antennenkalibrierung, Positionierung, Navigation in Lehre und Forschung. Kontakt: kersten@ife.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön
Jahrgang 1974, ist Leiter der Arbeitsgruppe Positionierung und Navigation sowie Sprecher des DFG Graduiertenkollegs I.C.Sens (GRK2159).



GIH, Arbeitsgruppe TLS-basierte Multi-Sensor-Systeme, Ingenieurgeodäsie und geodätische Auswertemethoden:

Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz
Jahrgang 1981, ist Leiter der Arbeitsgruppe TLS-basierte Multi-Sensor-Systeme Ingenieurgeodäsie und geodätische Auswertemethoden mit den Forschungsschwerpunkten Laserscanning und Multi-Sensor-Systeme in Forschung und Lehre. Kontakt: paffenholz@gih.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann
Jahrgang 1977, ist Institutsleiter des Geodätischen Instituts Hannover.





Teil werden. Bildung fördern. Zukunft gestalten.

Werden Sie als Mitglied der Universitätsgesellschaft auch Teil der Universität und unterstützen mit uns Studierende und Lehrende.

- Wissenschaftliche Projekte
- Stipendien
- Auszeichnung hervorragender wissenschaftlicher Leistungen
- Vorlesungsreihen

Weitere Informationen unter
www.leibniz-universitaetsgesellschaft-hannover.de

Mitmachen und sich engagieren.

Hiermit beantrage ich die **Mitgliedschaft** in der Leibniz Universitätsgesellschaft Hannover e.V. als

persönliches Mitglied Unternehmen / Körperschaft

Name, Vorname, Titel / Bei Unternehmen / Körperschaften: Ständige/r Vertreter/in

Unternehmen / Körperschaft

Geburtsdatum

Beruf / Tätigkeit

Straße, Nr.

PLZ / Ort

Telefon

E-Mail

Jahresbeitrag (Mindestbeitrag EUR 50,00 p.a.)



Formular bitte schicken an: Leibniz Universitätsgesellschaft Hannover e.V., Wilhelm-Busch-Straße 4, 30167 Hannover

Bei Fragen und Kontakt: 0511 762-19112
E-Mail info@universitaetsgesellschaft.uni-hannover.de

SEPA-Lastschriftmandat (Typ: Wiederkehrende Zahlung)

Name, Vorname (Kontoinhaber/in)

IBAN

BIC

Gläubiger-Identifikationsnummer der Leibniz Universitätsgesellschaft e.V.
Hannover: DE57ZZZ00001107847

Ich ermächtige den Zahlungsempfänger Leibniz Universitätsgesellschaft Hannover e.V., Zahlungen von meinem Konto mittels Lastschrift einzuziehen. Zugleich weise ich mein Kreditinstitut an, die vom Zahlungsempfänger Leibniz Universitätsgesellschaft Hannover e.V. auf mein Konto gezogenen Lastschriften einzulösen.

Hinweis: Ich kann innerhalb von acht Wochen, beginnend mit dem Belastungsdatum, die Erstattung des belasteten Betrages verlangen. Es gelten dabei die mit meinem Kreditinstitut vereinbarten Bedingungen.

Ort, Datum, Unterschrift

Jobs bei Geo++

Geo++ ist weltweit führender Entwickler von hoch-genauer GNSS-Positionierungssoftware. Unsere Technologie steckt hinter den professionellsten GNSS-Diensten und reicht von klassischem Network-RTK bis zu hochmodernem SSR, wie es z. B. bei QZSS-CLAS zum Einsatz kommt. Wir suchen Verstärkung für unser Team in Garbsen.

GNSS Netzwerk Spezialisten (m/w)

Geo++ GNSS Netzwerk-Spezialisten bestimmen und realisieren Lösungen für hoch-genaue GNSS-Korrekturen in enger Zusammenarbeit mit unseren Kunden, Softwareentwicklern und Wissenschaftlern.

Ihre Aufgaben

- ▶ Datenanalyse, Problemfindung und -Lösung
- ▶ Beratung, Schulungen und technische Betreuung unserer Kunden
- ▶ Qualitätssicherung unserer Software
- ▶ Systeminstallation und -konfiguration

Ihr Profil

- ▶ Lösungsorientiertes Arbeiten
- ▶ Kenntnisse in GNSS, Geodäsie und/oder Vermessung
- ▶ Interesse und Erfahrung mit Computern und Netzwerken
- ▶ Kontakt und kommunikationsstark

Software Entwickler (m/w)

Wir suchen einen erfahrenen Softwareentwickler, insbesondere für unsere Kernmodule zur Echtzeitauswertung von GNSS-Daten mit anspruchsvollen mathematischen Filtern und auf verteilten Systemen.

Ihre Aufgaben:

- ▶ Software Entwicklung in C/C++
- ▶ Design von automatisierten Tests
- ▶ Refactoring und Aktualisierung von vorhandenen Bibliotheken
- ▶ Software Design

Ihr Profil:

- ▶ Exzellente Kenntnisse in C/C++
- ▶ Erfahrungen mit komplexen Softwareprojekten
- ▶ Erfahrungen mit high-performance Code
- ▶ Erfahrungen mit time-critical multi-threaded Software
- ▶ Erfahrungen in agiler Entwicklung



Geo++ GmbH

Steinriede 8 | D-30827 Garbsen | Tel.: +49 (0)5131 4689 0 |
Fax: +49 (0)5131 4689 99 | info@geopp.de | www.geopp.de

Whg./Zi. für int.
Stud. drgd. ges.
T. 0511 768 80 69

Rajesh, 23, Indien

»Lasst uns nicht im Regen stehen!«

Internationale Studierende suchen Wohnraum
www.lasstunsnichtimregenstehen.de

/NiTIAT|:vE
W!SS€n5(HA°FT
Hannover

Vom All aus

EIN WELTRAUMBASIERTES LASERINTERFEROMETER VERMISST DAS ERDSCHWEREFELD

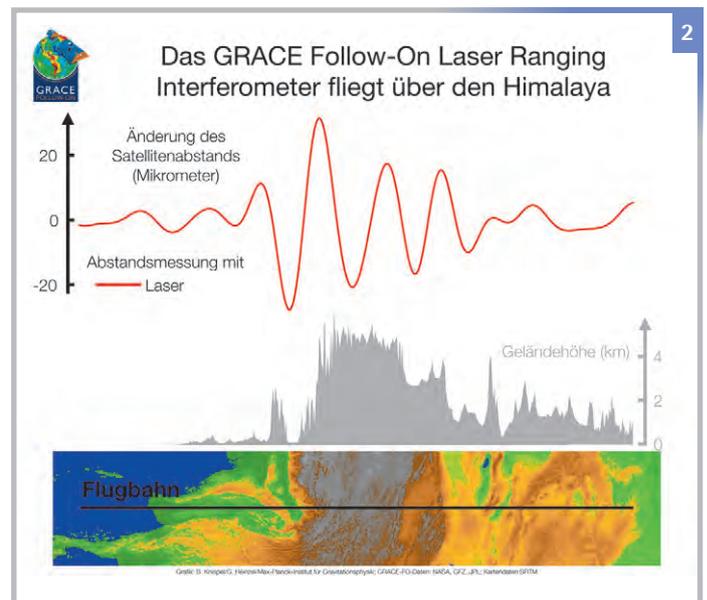
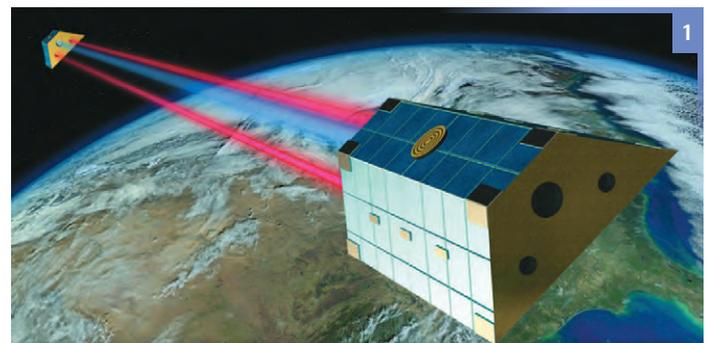
GRACE Follow-On ist eine gravimetrische Weltraummission, mit der anhand eines Satellitenpaares das Erdschwerefeld vermessen wird. Die monatlichen Karten des Erdschwerefelds, die aus den Daten von GRACE konstruiert werden, haben sich als wichtiges Werkzeug für Klima- und Geowissenschaftler etabliert. Ein Forschungsteam vom Institut für Gravitationsphysik stellt die Entwicklung neuer Sensoren für die Satellitengravimetrie vor.

Einleitung

Am Institut für Gravitationsphysik der Leibniz Universität und Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Detektion von Gravitationswellen. Das zugrunde liegende Messprinzip ist die Laserinterferometrie, die auf der Erde bereits erfolgreich zum Nachweis der von Einstein vorhergesagten Kräuselungen der Raumzeit eingesetzt wurde. Mit der Satellitenmission LISA-Pathfinder wurden darüber hinaus die Grundlagen für den zukünftigen Einsatz von Laserinterferometrie zur Gravitationswellendetektion im Weltall geschaffen. Die entwickelten Technologien lassen sich aber auch hervorragend auf andere Anwendung übertragen, bei denen hochpräzise Abstandsmessungen benötigt werden wie zum Beispiel die Vermessung des Erdschwerefeldes.

Das Laser Ranging Interferometer für GRACE Follow-On

Am 22. Mai 2018 ist das Satellitenpaar für die GRACE Follow-On Mission (siehe Abbildung 1) durch eine Falcon 9 Trägerrakete von Kalifornien aus ins All befördert worden, um schon wenige Minuten später den vorgesehenen Orbit in etwa 490 km Höhe zu erreichen. Beide Satelliten umkreisen mittlerer-



weile in Nord-Süd Richtung und mit etwa 220 km Abstand zueinander den Erdball, wobei die Erdrotation sicherstellt, dass die Bahnen bezüglich der Erdoberfläche stets verschoben werden, sodass die Satelliten bei jedem Umlauf unterschiedliche Gebiete überfliegen. Dadurch wird nach etwa einem

Monat die globale Abdeckung erreicht.

GRACE Follow-On ist wie die Vorgängermission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, 2002-2017) eine gravimetrische Mission, das heißt es wird das Erdschwerefeld vermessen. Dazu wird aus-

genutzt, dass räumliche und zeitliche Änderungen im Erdschwerefeld auch Veränderungen im Satellitenabstand verursachen, welcher wiederum interferometrisch sehr genau bestimmt werden kann (siehe *Abbildung 2*). Die Struktur des Erdschwerefeldes wird durch die Massenverteilung der Erde und ihrer Atmosphäre vorgegeben. Die Massenverteilung verändert sich, wenn zum Beispiel Eismassen in Grönland abschmelzen. Die monatlichen Karten des Erdschwerefeldes, die aus den Daten von GRACE konstruiert werden, haben sich als wichtiges Werkzeug für Klima- und Geowissenschaftler etabliert, sodass diese dringend auf eine Fortführung der Messungen durch GRACE Follow-On warten.

Diese Nachfolgemission besitzt neben dem bisherigen

Mikrowellen-Abstandsmessgerät auch ein neuartiges Laser Ranging Interferometer (LRI), welches die Abstandsänderungen noch genauer mittels Licht vermessen soll (siehe *Info-Kasten*). Das LRI ist ein Gemeinschaftsprojekt zwischen den USA und Deutschland und wurde auf deutscher Seite unter Federführung des Albert-Einstein-Institutes und der Leibniz Universität Hannover und mit einer Vielzahl von Universitäts- und Industriepartnern entwickelt. Es ist nach LISA Pathfinder das zweite weltumbasierte Laser-Interferometer, aber das erste zwischen zwei separaten Satelliten.

Das LRI wurde Mitte Juni aktiviert und die beiden Interferometer-Einheiten konnten bereits nach dem ersten Suchlauf eine optische Verbin-

dung herstellen. Diese initiale Ausrichtung des Systems ist ein komplexes Unterfangen, bei dem die Laserstrahlen bis auf etwa fünf Hundertstel Grad genau den entfernten Satelliten treffen müssen. Haben Sie schon einmal versucht, eine 1-Euro-Münze in 250 Meter Entfernung mit einem Laserpointer zu treffen? Die ersten vorläufigen Flugdaten des LRI deuten daraufhin, dass die geforderte Auflösungsgenauigkeit von 80 Nanometern in der Abstandsmessung sogar noch weit unterschritten werden kann. Der Erfolg dieser Mission ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu dem von der ESA entwickelten Weltraum-Gravitationswellenobservatorium LISA, welches ebenfalls auf Laserinterferometrie basieren, aber aus drei Satelliten bestehen wird.

Abbildung 1
Das Satellitentandem GRACE Follow-On vermisst den Satellitenabstand mit Lasern (in rot dargestellt) und mit Mikrowellen (in blau dargestellt).
(Quelle: Erde: NASA »Blue Marble«, Satelliten: D. Schütze/AEI)

Abbildung 2
Erste Messdaten des LRI bei einem Überflug der Himalaya-Region: Abstandsänderungen zwischen den Satelliten variieren um +/- 30 Mikrometer (oberer Teil); das Höhenprofil unter den Satelliten (mittlerer Teil); geographische Karte der Bodenspur (Flugbahn) (unterer Teil).
(Quelle: B. Knispel/G. Heinzl/Max Planck Institute for Gravitational Physics; GRACE FO data: NASA, GFZ, JPL; map data: SRTM)

Info-Kasten: Das Prinzip der laserinterferometrischen Abstandsmessung

Das Licht eines Lasers unterscheidet sich fundamental von Licht, wie wir es aus dem Alltag kennen. Der Schein der Sonne oder auch der einer herkömmlichen Glühbirne besteht aus vielen Lichtwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen (Farben), die zu völlig zufälligen Zeiten ausgesendet werden. Im Gegensatz dazu kann Laserlicht nur aus einer einzigen Wellenlänge bestehen. Außerdem sind die verschiedenen Teile der Welle zueinander in Phase, sie werden also immer zu einem bestimmten Zeitpunkt und nicht zufällig angeregt. Diese Eigenschaften ermöglichen es, dass die Berge und Täler zweier Laserstrahlwellen sich gegenseitig verstärken oder abschwächen können. Dieser Effekt wird als Interferenz bezeichnet.

Bei der laserinterferometrischen Abstandsmessung macht man sich dies zunutze. Im einfachsten Fall wird ein Laserstrahl an einem halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt. Eine Hälfte des Laserstrahls dient als Referenz, während die andere zum Objekt gesendet wird, dessen Abstand gemessen werden soll. Die beiden Laufwege der Strahlen werden Interferometer-Arme genannt. Der Messstrahl wird am Objekt (der sogenannten Testmasse) reflektiert und an einem zweiten halbdurchlässigen Spiegel mit dem Referenzstrahl überlagert. Mithilfe eines Photodetektors misst man nun die Intensität dieser Überlagerung. Ändert das Objekt seinen Abstand, wird dadurch die Weglänge, die der Messstrahl zurücklegen muss, geändert. Dies führt dazu, dass sich die Berge und Täler der Lichtwelle relativ zu denen des Referenzstrahls verschieben und somit die Intensität auf dem Photodetektor geändert wird. Durch eine Kalibrierung auf die Wellenlänge des Laserlichts lässt sich die Intensitätsänderung auf eine Abstandsänderung zurückrechnen. Allerdings ist diese Form

der Messung auf maximale Weglängenänderungen von einer Wellenlänge limitiert, typischerweise etwa 1 Mikrometer, da sich bei Vielfachen der Wellenlänge das Signal ununterscheidbar wiederholt. Im gerade beschriebenen Fall spricht man von homodyner (altgr.: gleich bewegter) Interferometrie, da die Wellen von Mess- und Referenzstrahl die gleiche Frequenz haben. Im Gegensatz dazu wird bei der Heterodyn-Interferometrie mit zwei verschiedenen Frequenzen gearbeitet. Dadurch entsteht auf dem Signal ein Photodetektor eine Schwebung, ähnlich wie bei zwei Musikinstrumenten, die nicht exakt gleich gestimmt sind. Das eigentliche Längensignal wird dabei zunächst von der Schwebung maskiert, weshalb ein größerer technischer Aufwand notwendig ist, um es zu extrahieren. Ebenso ist die Erzeugung und Kontrolle von zwei Laserfrequenzen mit einem Mehr an Technik verbunden. Der Vorteil ist allerdings, dass die absolut messbare Abstandsänderung nicht mehr auf die Länge eines Wellenzuges limitiert ist. Aus diesem Grund hat sich die Heterodyntechnik in der interferometrischen Längemessung bei Satellitenmissionen durchgesetzt, da hier absolute Längeneänderungen im Bereich von Metern bis Kilometern auftreten.

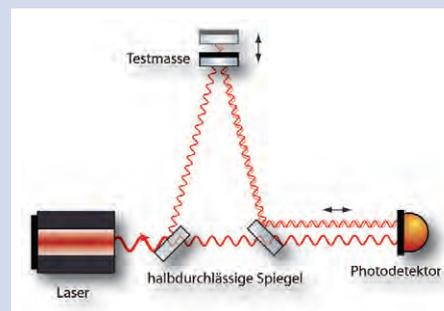


Abbildung
Schematische Darstellung eines einfachen Laserinterferometers.

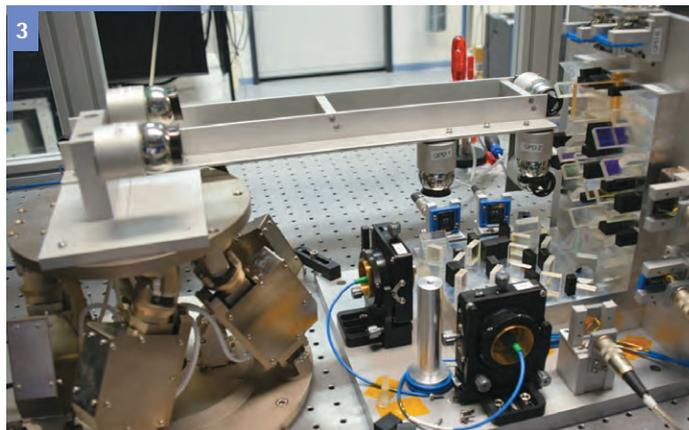
Im Hinblick auf zukünftige Satellitenmissionen bieten die Labore im neuen HITec Gebäude der Leibniz Universität eine optimale Umgebung sowohl für die Entwicklung von Komponenten und Algorithmen für die Laserausrichtung im Weltraum als auch für weitere Untersuchungen der derzeit limitierenden Störfaktoren mit dem Ziel, zukünftige Interferometer unempfindlicher für diese zu machen.

weise auf der sogenannten Heterodyn-Interferometrie (siehe Info-Kasten). Diese ermöglicht es, Abstandsänderungen auf langen Zeitskalen hochpräzise zu messen, während sich die Testobjekte über viele Wellenzüge (also viel mehr als 1 Mikrometer) bewegen. Wie die LISA Pathfinder Mission erstmals eindrucksvoll bewiesen hat, erreichen solche Interferometer im Weltraum Genauigkeiten, die mehr

frequency modulation, DFM). Diese Technik erfordert einen komplexen Auslesealgorithmus, vereinfacht den optischen Aufbau des Interferometers jedoch erheblich, ohne dabei die Vorteile der Heterodyn-Interferometrie aufzugeben. Zur Signalerzeugung wird der Laserstrahl in ein Interferometer mit ungleicher Armlänge geschickt, da sich die Frequenzmodulation bei gleicher Armlänge von Mess- und Referenzstrahl aufheben würde. Gleichzeitig vermisst der längere Arm den Abstand zur Testmasse. Mit derzeit erhältlichen Lasersystemen reichen bereits Armlängenunterschiede von wenigen Zentimetern aus. Dadurch können die Interferometer sehr kompakt als sogenannte Messköpfe aufgebaut werden. Durch die Installation mehrerer Messköpfe lassen sich die verschiedenen Freiheitsgrade eines Objekts auslesen. Zusätzlich wird ein einzelnes, stabiles Referenzinterferometer benutzt, um die Frequenzschwankungen der Messköpfe gegeneinander zu subtrahieren. Dieses Konzept wurde 2015 gemeinsam mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) in Maryland, USA, entwickelt und dort erstmals experimentell untersucht.

Im Rahmen einer kürzlich an der Leibniz Universität abgeschlossenen Doktorarbeit wurde eine auf Prismen basierte Topologie für die Messköpfe vorgeschlagen. Hierbei wird das gesamte Interferometer mittels einer einzigen optischen Komponente realisiert (siehe Abbildung 4). Die Genauigkeit der DFM Interferometrie in Kombination mit solchen Prismen wurde erprobt, indem zwei Interferometer die Bewegung einer gemeinsamen Testmasse (ein bewegbarer Spiegel) vermaßen. Aus der Kombination der Messsignale von den beiden Seiten des Spiegels kann

Abbildung 3
Optischer Aufbau des Labor-experimentes mit einem Interferometer zur Messung von Bewegungen in sechs Freiheitsgeraden. Links im Bild das mechanische Rotations-Translation-System.
(Quelle: V. Müller/AEI)



Beispielsweise wird derzeit ein Laser-Interferometer getestet, welches die Bewegungen von kommerziell verfügbaren Rotations- und Translationsplattformen im Labor in allen sechs Freiheitsgeraden (drei Raumrichtungen und die drei Drehwinkel) präzise vermessen soll (siehe Abbildung 3), womit die sogenannte tilt-to-length-Kopplung besser quantifiziert werden kann. Die laserinterferometrische Messung von mehreren Freiheitsgeraden ist auch für neue Sensoren von Bedeutung, auf die in den folgenden beiden Abschnitten näher eingegangen wird.

Kompakte optische Testmassen-Auslesung mittels tiefer Frequenzmodulation

Laserinterferometrie für Satellitenmissionen wie GRACE Follow-On, LISA Pathfinder und LISA basiert typischer-

als 100-mal unter der Größe eines Wasserstoffatoms liegen (< 1 Pikometer).

Zukünftige Experimente und Missionen im Bereich der Geodäsie und Gravitationsphysik möchten sich diese Genauigkeiten zunutze machen und mehrere Testmassen und deren Freiheitsgrade erfassen. Die Herausforderung liegt darin, solche Auslesesysteme kompakt und skalierbar zu machen, ohne an Genauigkeit einzubüßen. Dies erfordert neben der Miniaturisierung der optischen Systeme, die Erforschung neuer Interferometer-Techniken, die im Vergleich zur Heterodyn-Interferometrie deutlich einfacher aufgebaut und somit besser skalierbar sind.

Hierfür wurde eine Technik entwickelt, bei der ein einzelner Laserstrahl sehr stark (tief) in seiner Frequenz moduliert wird (engl. *deep*

die Messgenauigkeit bestimmt werden. Ein stabiles Referenzinterferometer wurde ebenfalls entwickelt und vermessen. Ähnlich wie bei LISA Pathfinder wurden für die Experimente alle Komponenten auf eine thermisch stabile Glaskeramik aufgebracht. Die Komponenten wurden präzise vorjustiert und mittels UV-Licht-härtendem Klebstoff fixiert (siehe Abbildung 5). Die bisherigen Messungen zeigen,

Messung von Störkräften mit Hilfe eines Torsionspendels

Die satellitenbasierte laserinterferometrische Abstandsmessung zwischen Testmassen zur Bestimmung von Gravitationsfeldern liefert die wissenschaftlich wertvollsten Daten im sogenannten *drag-free* Modus. Dabei werden die Testmassen von allen Störkräften abgeschirmt und befinden sich im freien Fall; sie

Vorhandensein weitaus stärkerer Kräfte, insbesondere der Erdanziehungskraft. Im Vergleich zu den Bedingungen auf der Erde sind die Störungen im All etwa 10 Größenordnungen kleiner. Angesichts der dominierenden Wirkung der Schwerkraft entlang der Vertikalen ist der beste Ansatz, solche winzigen Kräfte auf der Erde nachzuweisen, Freiheitsgrade in der horizontalen Ebene auszunutzen.

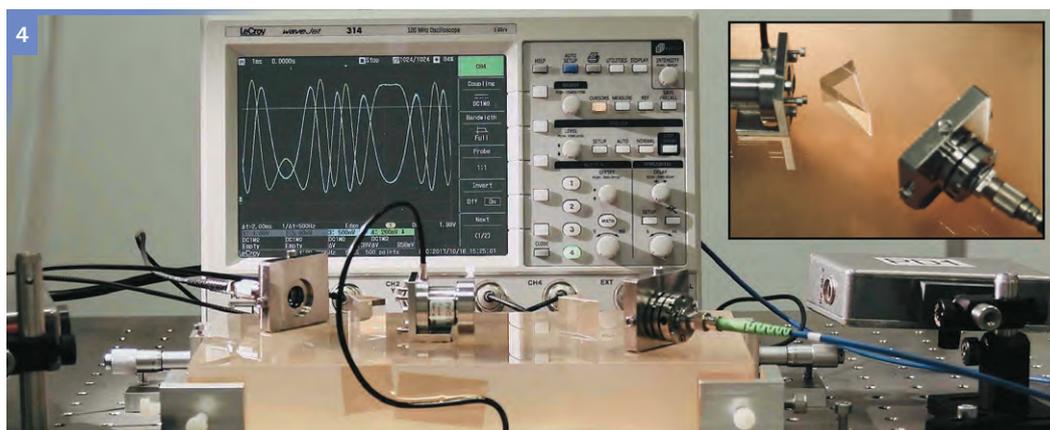


Abbildung 4
Foto des optischen Aufbaus und des auf dem Oszilloskop beobachteten Signals eines kompakten Interferometers zur Auslesung einer Testmasse von zwei Seiten mittels tiefer Frequenzmodulation (Ausschnitt: Messkopf mit Prisma von oben). (Quelle: K.-S. Isleif/AEI)

dass diese kompakten Ausleseverfahren durchaus vergleichbare Genauigkeiten zur konventionellen Heterodyn-Interferometrie erreichen können.

In den HITec Laboren wird diese optische Auslesetechnik nun in verschiedenen Experimenten zur Anwendung gebracht und entsprechend weiter verbessert. Unter anderem werden noch kompaktere Messköpfe entwickelt und auch deren Anzahl soll erhöht werden. Parallel dazu wird an den Auslesesystemen (sogenannten Phasenmetern) und den dafür relevanten Algorithmen geforscht. Damit soll der Weg geebnet werden, diese Techniken in zukünftigen Missionen zur Anwendung zu bringen. Allerdings sind viele weitere Untersuchungen notwendig, um ungewollte Störeinflüsse zu minimieren und die Weltraum-Tauglichkeit zu gewährleisten.

sind »schwerelos«. Dazu müssen die Satelliten, innerhalber der Testmassen schweben, diesen folgen und durch sanften Schub die Kräfte, die von außen auf sie einwirken, kompensieren, sodass die Testmassen stets zentriert bleiben. Im Vergleich zum umgekehrten Modus, bei dem die Testmassen aktiv zentriert gehalten werden, ist der *drag-free* Modus experimentell anspruchsvoller. Die messbaren Daten sind dafür aber auch frei von den Störungen, die bei der aktiven Kontrolle auftreten würden.

Im Satelliten müssen die Testmassen sorgfältig vor allen Störkräften wie etwa elektrostatischen Oberflächeneffekten, Magnetfeldern oder Gasdämpfungseffekten geschützt werden. Im Labor ist die größte Herausforderung bei der Entwicklung und Charakterisierung der Testmassen und deren Auslesesystemen das

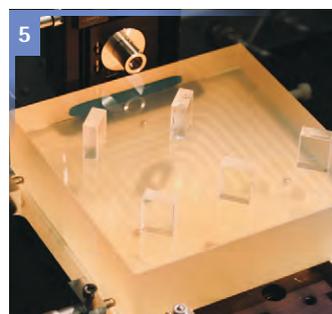
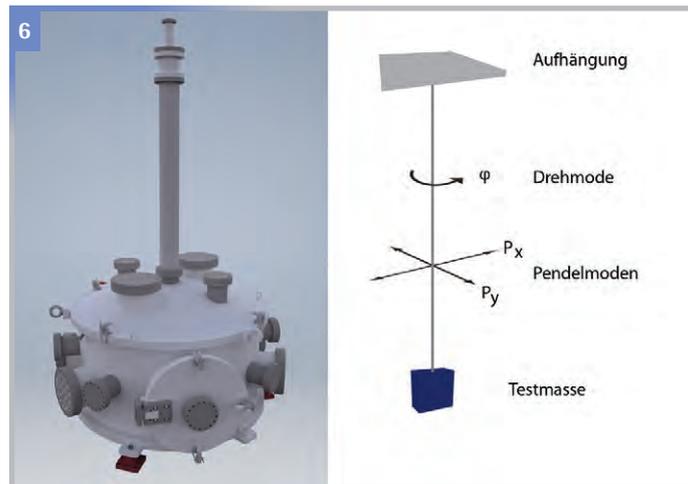


Abbildung 5
Foto eines Referenzinterferometers, welches in einer Mach-Zehner-Konfiguration realisiert und mithilfe von UV-Licht-härtendem Klebstoff auf einer Glasplatte mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten fixiert wurde. (Quelle: K.-S. Isleif/AEI)

Im neuen HITec-Gebäude wird dafür ein Torsionspendel gebaut, auch Dreh- oder Torsionswaage genannt. Ein Torsionspendel ist das geeignetste Werkzeug, um »Schwerelosigkeit« in der Horizontalen zu simulieren und erlaubt Messungen auf Femto-Newton-Niveau, wie sie für die Entwicklung und Erprobung neuartiger optischer Gravitationssensoren und Komponenten für zukünftige *drag-free* Weltraummissionen erforderlich sind. Unser Ziel ist es, eine extrem kraftarme Umgebung in der horizon-

Abbildung 6
3D-Darstellung der Vakuumkammer. Die Kammer besteht aus einer Bodenplatte, einem zylindrischen Mittelteil und einem Deckel mit Rohraufsatz zum Aufhängen der Torsionsfaser. Die Kammer hat zwei Türen und eine Vielzahl von Anschlussmöglichkeiten. Diese werden für die Installation von Pumpen, Druckmessgeräten und Durchführungen elektrischer und optischer Signale für den Betrieb der geplanten Experimente benötigt.



Rechts: Prinzipskizze des Torsionspendels. Die dünne Faser ist fest mit der Aufhängung verbunden. Eine Testmasse hängt am Ende der Faser. Die Pendelmoden müssen möglichst gut unterdrückt werden, da sich das eigentliche Mess-Signal in der Drehmode befindet.

(Quelle: V. Händchen, M. Mehmet/AEI)

talen Ebene zu erreichen, so dass wir die kleinen Störkräfte auf Testmassen untersuchen und rauscharme optische Sensoren, wie zum Beispiel die auf DFM basierenden Messköpfe, testen und weiterentwickeln können.

Das Prinzip unseres Torsionspendels ist einfach. Eine Test-

masse wird an einer 1 Meter langen und 50 μm dünnen Wolfram-Faser in einer Vakuumkammer aufgehängt (siehe Abbildung 6). Anschließend misst man die durch Störkräfte verursachte Drehung um die vertikale Achse. Bei entsprechender Materialauswahl und Pendelkonstruktion kann sich die aufgehängte Testmas-

se nahezu frei drehen. Zur hochpräzisen Messung dieser Bewegungen sollen spezielle Laserinterferometer und eine aktive Stabilisierung der Pendelaufhängung und der Pendelschwingung entwickelt werden.

Die Anforderungen an den experimentellen Aufbau und die Laborumgebung sind dabei sehr hoch. Unter anderem wird eine gute mechanische und thermische Stabilität über mehrere Tage benötigt, veränderliche Magnetfelder müssen abgeschirmt werden und der Betrieb muss bei sehr geringem Druck (Vakuum von 10^{-8} bis 10^{-9} mbar) stattfinden. Das neue HITec Labor bietet mit seinem speziellen Fundament, konstanten klimatischen Bedingungen und einer Infrastruktur, die das Auslagern von vibrierenden Geräten aus dem Labor erlaubt, optimierte Bedingungen für dieses Experiment.



Dr. Moritz Mehmet

Jahrgang 1978, arbeitet am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut). Sein Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung und Charakterisierung neuer Sensoren für die interferometrische Messung der Bewegung von Testmassen und die Erzeugung von gequetschtem Licht für erdgebundene Gravitationswellendetektoren. Kontakt: moritz.mehmet@aei.mpg.de



Dr. Katharina-Sophie Isleif

Jahrgang 1989, promovierte 2018 an der Leibniz Universität und arbeitet am Institut für Gravitationsphysik in der Abteilung Weltrauminterferometrie. Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Miniaturisierung von Interferometern, neue Interferometertechniken und die Charakterisierung optischer Phasenreferenzen für LISA. Kontakt: katharina-sophie.isleif@aei.mpg.de



Dr. Vitus Händchen

Jahrgang 1987, ist Postdoc in der Abteilung Weltrauminterferometrie am Institut für Gravitationsphysik. Er arbeitet an der Realisierung einer hochsensiblen Torsionswaage für die Charakterisierung neuer interferometrischer Sensoren. Kontakt: vitus.haendchen@aei.mpg.de



Dr. Vitali Müller

Jahrgang 1986, arbeitete während und nach seinem Physik-Studium an der Leibniz Universität und am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) für Gravitationsphysik in der Abteilung Weltrauminterferometrie mit Schwerpunkt »gravimetrische Satellitenmissionen« wie GRACE Follow-On. Kontakt: vitali.mueller@aei.mpg.de



Dr. Oliver Gerberding

Jahrgang 1986, arbeitet seit 2015 als Postdoc am MPI für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in der Abteilung Weltrauminterferometrie. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt in der Erforschung neuer Interferometrie Techniken und in der Entwicklung kritischer Technologien für den weltraumbasierten Gravitationswellendetektor LISA. Kontakt: oliver.gerberding@aei.mpg.de



Fertigung
Kazim Akcay

Vertrieb
Lora Benz

Entwicklung
Viktor Bauer

DAMIT SICH ERFINDERGEIST UNBEGRENZT AUSBREITEN KANN.

Hochmoderne Technologien, richtungsweisende Lösungen und internationale Präsenz – dafür steht WAGO. Und für mehr als 8.000 ambitionierte Menschen weltweit, die Innovation zu ihrer Passion gemacht haben und gemeinsam exzellente Arbeit leisten. Als einer der führenden Anbieter von elektrischer Verbindungs- und Automatisierungstechnik bieten wir Ihnen individuelle Entwicklungschancen in einem familiären Umfeld.



Finden Sie in unserem Stellenportal den Job, der zu Ihnen passt.
www.wago.com/karriere



Ultragenau Taktgeber

OPTISCHE UHREN IN DER ANWENDUNG

Im HITec arbeiten Geodäten und Physiker der Leibniz Universität Hannover (LUH) zusammen mit Wissenschaftlern der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unter anderem daran, optische Uhren und deren Vergleiche für Anwendungen in der sogenannten relativistischen Geodäsie zu erschließen. Anhand dieser neuen Technologien können unter anderem postglaziale Anhebung von Landmassen oder der Anstieg des Meeresspiegels vermessen werden.

Einführung

Optische Atomuhren sind die genauesten Messinstrumente, die uns aktuell zur Verfügung stehen. Die besten heutigen Uhren haben eine relative Gangungenauigkeit von wenigen 10^{-18} ; damit würde die Zeitdifferenz zwischen diesen Uhren nach 14 Milliarden Jahren – der Zeit vom Urknall bis heute – weniger als eine Sekunde betragen. Eine berechtigte Frage drängt sich geradezu auf: Wer braucht überhaupt so genaue Uhren? Diese ultragenauen Taktgeber finden unter anderem Anwendungen in der Grundlagenforschung wie zum Beispiel bei der Beantwortung der Frage nach dunkler Materie, deren Existenz eine mögliche Erklärung für erstaunliche astrophysikalische Phänomene ist. Eine Wechselwirkung mit »normaler« Materie würde zu einer Verschiebung von Energieniveaus in Atomen führen. Bestimmte Modelle dunkler Materie sagen Oszillationen oder Dichteunterschiede voraus, die wir beim Durchflug der Erde durch dunkle Materie über einen sich ändernden Gangunterschied zwischen unterschiedlichen optischen Uhren messen könnten.

Aber es gibt auch praktische Anwendungen optischer Uhren, die von der hohen Genauigkeit profitieren wie zum Beispiel in der Geodäsie. Eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie ist die Etablierung



von Höhenreferenzsystemen und die Bestimmung von Höhenunterschieden, um beispielsweise den Anstieg des Meeresspiegels oder langsame Landanhebungen oder -absenkungen zu bestimmen. Daher arbeiten im HITec Geodäten und Physiker der Leibniz Universität Hannover (LUH) zusammen mit Wissenschaftlern der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unter anderem daran, optische Uhren und deren Vergleiche für Anwendungen in der sogenannten relativistischen Geodäsie zu erschließen. Nach Albert Einsteins Relativitätstheorie gehen Uhren in einem Gravitationspotenzial (wie dem der Erde) langsamer, als Uhren außerhalb eines solchen Potenzials. Mit einer relativen Gangänderung von 10^{-16} pro Meter Höhenunterschied ist der Effekt auf der Erde win-

zig, aber mit heutigen Uhren sind Höhenunterschiede von wenigen cm bereits messbar. Dabei ist die erreichbare Höhengauigkeit unabhängig vom Abstand zwischen den Uhren und nur limitiert durch die Genauigkeit, mit der die Uhren verglichen werden können.

Für den Einsatz in der Geodäsie müssen optische Uhren noch »feldtauglich« werden: Das heißt, die fragilen Laboraufbauten müssen transportabel und unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen gemacht werden, sodass Uhren nach dem Transport an geodätisch relevante Orte auch wieder funktionieren. Dafür sollen zusammen mit anderen HITec Wissenschaftlern beispielsweise spezielle miniaturisierte Komponenten für optische Uhren entwickelt und getestet werden.

Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung in der relativistischen Geodäsie ist die hochpräzise Übertragung von Frequenzen über große Distanzen, um die Uhren miteinander vergleichen zu können. Daher wird im HITec am Uhrenvergleich über Freistrahlstrecken geforscht, die eines Tages Uhrenvergleiche über Satellit und damit sogar über Kontinente hinweg ermöglichen könnten.

Darüber hinaus sollen im HITec auch anderen Forschern hochgenaue Zeit- und Frequenzreferenzen zur Verfügung gestellt werden. Dazu wird ein entsprechendes Signal, das über eine optische Faser von der PTB in Braunschweig ans HITec geliefert wird, dort mit höchster Qualität und Ausfallsicherheit in die Labors verteilt.

Miniaturisierte Komponenten für optische Uhren

Uhren basieren im Allgemeinen auf der Zählung von periodischen Vorgängen wie zum Beispiel der Rotation der Erde oder der Schwingung eines Quarzes. Optische Uhren nutzen als Referenz schmalbandige Übergänge zwischen zwei elektronischen Zuständen in gefangenen und mit Laserlicht gekühlten Atomen. Durch Abfragen des Übergangs mit einem Uhrenlaser kann die Frequenz des Lasers auf den Übergang stabilisiert werden. Die Schwingungen des Lasers bei optischen Frequenzen im Bereich von 500 Billionen Schwingungen pro Sekunde (500 THz) stellt den Ausgang der Uhr dar, der entweder gezählt oder mit anderen Uhren verglichen werden kann. Je frequenzstabiler und schmalbandiger der Uhrenlaser ist, desto kürzer ist die erforderliche Mittelungszeit, um eine bestimmte Frequenzauflösung zu erreichen. Um die sehr schmalen optischen Übergänge abfragen zu kön-

nen, werden Uhrenlaser meist auf optische Resonanzen von Spiegelresonatoren vorstabilisiert. Dazu muss der Abstand der Spiegel auf ein Zehntel des Durchmessers eines Protons stabil gehalten werden! Im HITec sollen daher ausgehend von an der PTB entwickelten Resonator-Designs (siehe *Abbildung 1*) transportable Systeme entwickelt werden, die unempfindlich gegenüber störenden Vibrationen und Temperatureinflüssen sind und deren intrinsische thermische Restbewegung möglichst klein ist. Dazu wurden in einem der HITec Labore vom Rest des Gebäudes getrennte Sockel gegossen, die eine besonders schwingungsarme Umgebung für den Aufbau und die Charakterisierung der optischen Resonatoren zur Verfügung stellen.

Für das Kühlen und Einfangen der Atome sind komplexe optische Aufbauten mit vielen schaltbaren und fein in ihrer Frequenz abstimmbaren Laserstrahlen notwendig. Diese Aufbauten müssen typischerweise auf wenige Mikrometer genau über mehrere Meter Strahlweg stabil bleiben. Das sind große Herausforderungen an die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Aufbaus. Im HITec sollen in Zusammenarbeit mit Experten für derartige Aufbauten am Institut für Quantenoptik und dem Albert-Einstein-Institut sowie den Glasfaser-Spezialisten vom Laser Zentrum Hannover kompakte sowie thermisch- und vibrationsunempfindliche optische Aufbauten für Uhren realisiert werden, die sogar Raketenstarts überstehen. Dazu sollen neben der Miniaturisierung konventioneller Aufbauten auch Ansätze basierend auf Hydroxid-katalytischem Verbinden sowie Aufbauten ganz in Glasfasern realisiert und getestet werden. Weiterhin sollen hier bis-

lang kommerziell nicht verfügbare gehärtete Glasfasern für ultra-violettes Licht für diesen Einsatz entwickelt werden. Eine enge Abstimmung zwischen HITec Wissenschaftlern und den Uhren-Experten der PTB stellt sicher, dass die entsprechenden Komponenten direkt in existierenden beziehungsweise im Aufbau befindlichen transportablen optischen Uhren zum Einsatz kommen. Durch den im HITec erzielten Technologieschub in der Entwicklung optischer Uhren werden neue Anwendungen in der Geodäsie, wie die Vermessung der postglazialen Anhebung von Landmassen oder der Anstieg des Meeresspiegels, erst möglich.

Frequenz-Freistrahübertragung

Faser-gestützte Methoden zur Frequenzübertragung ermöglichen höchstpräzise Messungen und Vergleichsexperimente über weite Strecken quer durch Deutschland und Europa. Aktuell werden dazu meist konventionelle Glasfasern eingesetzt, die mit speziellen Verstärkern ausgestattet einen störungsfreien Vergleich der Uhren auf einem Niveau von 10^{-18} und besser ermöglichen. Dieser Ansatz ist jedoch auf Uhrenvergleiche zwischen Standorten limitiert, welche mit einer entsprechenden hochwertigen bidirektionalen Faserverbindung verbunden sind. Insbesondere Frequenzvergleiche über Kontinente hinweg gestalten sich schwierig, da die in Unterseekabeln verbauten Verstärker für den Uhrenvergleich nicht geeignet sind. Eine Vielzahl an zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten optischer Uhren, wie zum Beispiel die relativistische Geodäsie, erfordern hingegen Frequenzvergleiche zwischen weit entfernten, teilweise mobilen Stationen. Um diese Anwendungen erschließen zu können, wären Satellitenge-

Abbildung 1
An der PTB entwickelter transportabler optischer Resonator.
Bild: PTB

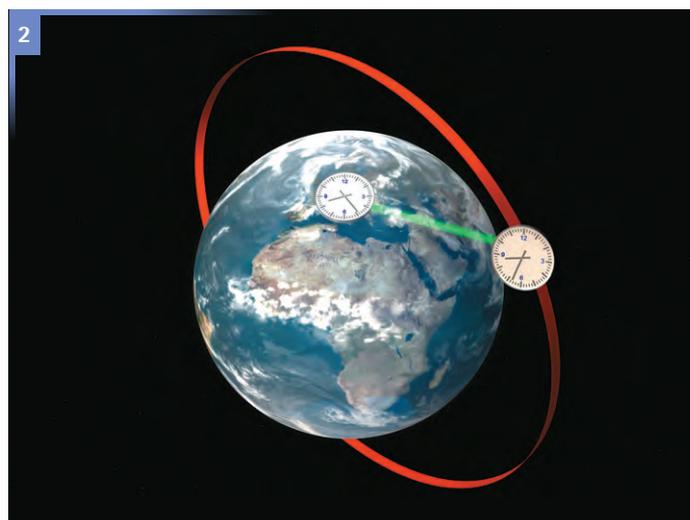
stützte Übertragungswege ideal. Schon jetzt werden internationale Zeitskalen über bidirektionale Hochfrequenz-Verbindungen über Satelliten etabliert. Aufgrund der im Vergleich zu Schwingungen bei optischen Frequenzen um bis zu eine hunderttausend Mal langsameren Schwingungsfrequenz dieser Verbindungen ist die erreichbare Auflösung entsprechend geringer und für den Vergleich

satz ist die Sichtbarkeit des Satelliten bei schlechtem Wetter und die durch Turbulenzen hervorgerufenen optische Weglängenänderungen. Da die meisten Turbulenzen in den ersten 5 bis 10 km in der Erdatmosphäre auftreten, genügt es, horizontale Freistrahlstrecken mit dieser Distanz zu untersuchen. In den speziell dafür ausgelegten Dachlabors im HITec sollen optische Transponder entwi-

sowie die Entwicklung von Strategien um Phasenfehler von mehr als einem Radian aufgrund der großen Störungen mit möglichst kurzer Latenz zu kompensieren. Als weiterer Schritt sollen optische Inter-Satelliten-Frequenzvergleiche für flexible Feldstudien und interkontinentale Vergleiche realisiert werden.

Mit der Möglichkeit optische Frequenz- und Zeitsignale mit Satelliten auszutauschen, eröffnen sich neue Möglichkeiten jenseits der kontinentübergreifenden relativistischen Geodäsie. So wären zum Beispiel optische Uhren in Navigationssatelliten der nächsten Generation mit höherer Positionsgenauigkeit denkbar. Synchronisierung der Uhren in den Navigationssatelliten durch direkte optische Links würde zu einer höheren Ausfallsicherheit führen, da nur noch sporadisch Kontakt mit Bodenstationen aufgenommen werden müsste.

Abbildung 2
Illustration des optischen Freistrahlfrequenzvergleichs zwischen einer Bodenstation und einem Satelliten.



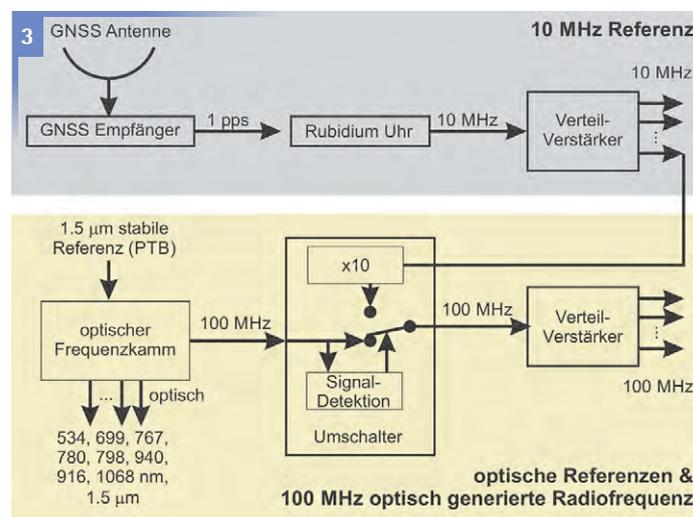
von optischen Uhren daher nicht adäquat. Einen Ausweg bieten zukünftige bidirektionale optische Freistrahverbindungen zwischen Bodenstationen und Satelliten (siehe Abbildung 2). Ein offensichtliches Problem bei diesem An-

kelt und für Freistrahübertragung eingesetzt werden. Wichtige Forschungsfragenstellungen, die beantwortet werden sollen, sind das Mitführen des Laserstrahls bei nicht-geostationären Satelliten entlang der Satellitenbahn

Multi-Nutzer Frequenzverteilung zwischen PTB und HITec

Neben Anwendungen in der relativistischen Geodäsie und der Navigation stellen hochgenaue Zeit- und Frequenzsignale auch für andere Nutzer im HITec eine wertvolle Ressource dar. So können beispielsweise die Rauscheigenschaften von Lasern und optischen Resonatoren für Gravitationswellendetektoren (s. Beitrag »Vom All aus« in dieser Ausgabe) charakterisiert werden. Laser und Radiofrequenzen mit überragenden Kohärenzeigenschaften werden in der Atominterferometrie mit langer Basislinie (s. Beitrag »Der VLBAI-Teststand«) und der Quantenmetrologie mit kalten Atomen (s. Beitrag »Spukhafte Fernwirkung zwischen kalten Atomen«) benötigt. HITec

Abbildung 3
Schema der Frequenzverteilung im HITec. **Oben:** Verteilung einer auf GNSS basierten standard 10 MHz Referenz für alle Labors. **Unten:** Transfer einer hochstabilen optischen Referenz auf eine optisch generierte Radiofrequenz und optische Nutzerfrequenzen.



Forschung an globalen Satellitennavigationssystemen (Global Navigation Satellite System, GNSS) profitieren davon, dass über eine präzise Zeitreferenz der Uhrenfehler in den Satelliten-Signalen herausgerechnet werden kann. All diese Forschungsanwendungen werden von einer in Deutschland einzigartigen Infrastruktur bedient (siehe *Abbildung 3*): Die PTB in Braunschweig liefert ein hochgenaues optisches Frequenzsignal bei 1.5 µm Wellenlänge über stabilisierte Glasfasern ans HITec. Dort wird das Signal mit Hilfe ei-

nes sogenannten optischen Frequenzkamms, den man sich als Meterstab im Frequenzraum vorstellen kann, zu den benötigten Wellenlängen und Radiofrequenzen konvertiert. Eine wesentliche Forschungsaufgabe im HITec wird es sein, praktikable und im Hinblick auf zukünftige Anwendungen auch für die Industrie taugliche Multi-Nutzer-Verteilerkonzepte auf höchstem Qualitätsniveau und einer 24/7 Verfügbarkeit zu entwickeln. Daher sollen auch Rückfallkonzepte, wie zum Beispiel das automatische Umschalten von der op-

tischen Referenz auf eine qualitativ etwas schlechtere, aber lokal verfügbare, Mikrowellen-Referenz implementiert werden. Neben der Forschung an der Verteilung optischer Referenzen höchster Güte sollen auch die Erzeugung und Verteilung von besonders rauscharmen Radiofrequenzen im HITec untersucht und ausgewählten Labors zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht neue Anwendungen beispielsweise in der Messtechnik und könnte zusammen mit Industriepartnern kommerzialisiert werden.



Prof. Dr. Piet O. Schmidt

Jahrgang 1970, ist seit 2009 Professor für Experimentalphysik an der Leibniz Universität Hannover und Leiter des QUEST-Instituts für Experimentelle Quantenmetrologie an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Seit 2016 ist er Sprecher des SFB 1227 DQ-mat. Seit 2017 ist er Mitglied im HITec-Vorstand und Mitglied im Wissenschaftlichen Rat von QUANOMET. Kontakt: Piet.Schmidt@quantummetrology.de



Dr. Anna-Greta Paschke

Jahrgang 1985, studierte Physik an der Universität Hamburg und promovierte am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover, wo sie seit 2017 eine Arbeitsgruppe leitet. Kontakt: paschke@iqo.uni-hannover.de



Dr. Harald Schnatz

Jahrgang 1957, ist seit 2011 Leiter des Fachbereichs Quantenoptik und Längeneinheit an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Kontakt: Harald.Schnatz@ptb.de



HANNOVER

25 Jahre Partner-Hotel der Leibniz Universität Hannover

42 moderne Zimmer ■ Gute Anbindung zu den Fakultäten und zum Wissenschaftspark Marienwerder!

UNI-Sonderpreise: ■ Classic Einzelzimmer 72,00 Euro
 ■ Classic Einzelzimmer Garten 79,00 Euro
 ■ Doppel-/Zweibettzimmer 98,00 Euro
 ■ Inklusive Vital-Frühstücksbuffet und W-Lan

Erfragen Sie unsere Gruppenrabatte!

Hotel in Herrenhausen

Markgrafstraße 5
 30419 Hannover
 Tel.: 0511 - 7907 600
 Fax: 0511 - 7907 698
info@hotel-in-herrenhausen.de
www.hotel-in-herrenhausen.de
S-Bahn Linie 4+5 direkt am Hotel

Spukhafte Fernwirkung zwischen kalten Atomen

WIE VERSCHRÄNKTE ATOME PRÄZISIONSMESSUNGEN VERBESSERN

Quantenmechanisch korrelierte, also verschränkte Atome eröffnen vielfältige Anwendungen, insbesondere im Bereich der Präzisionsmessungen.

Am Institut für Quantenoptik ist es erstmalig gelungen, die Verschränkung nicht nur innerhalb einer Atomwolke, sondern zwischen zwei räumlich ge-

trennten Wolken nachzuweisen.

Am HITec sollen solche verschränkten Wolken nicht nur wenige Mikrometer, sondern meterweit aufgetrennt werden, um so Präzisionsmessungen der Gravitation entscheidend zu verbessern.

Quantenmechanik

Seit ihrer Entwicklung in den 1920er und 1930er Jahren hat sich die Quantenmechanik als ein zuverlässiger Stützpfiler der modernen Physik erwiesen. In der herkömmlichen Physik konnten die physikalischen Grundgrößen beliebige, kontinuierliche Werte annehmen. In der Quantenmechanik sind bestimmte physikalische Größen aber „quantisiert“ und können nur bestimmte, diskrete Werte annehmen, ganz so, wie man Wasser zwar in beliebigen Mengen kaufen kann, aber Äpfel nur in Vielfachen eines einzelnen Apfels.

Ein gutes Beispiel ist der Spin der Atome, den man sich wie die Ausrichtung kleinster Magnete vorstellen kann. In der Quantenmechanik kann die Spinausrichtung entlang einer Achse nur diskrete Werte annehmen, in der einfachsten Form nur nach oben (*spin-up*) und nach unten (*spin-down*). Faszinierenderweise ist die Quantisierung immer gültig, egal entlang welcher Achse man sich entscheidet zu messen.

Nun können nicht nur diese beiden Orientierungen auftreten, sondern auch anteilige Überlagerungen, zum Beispiel 50 Prozent *spin-up* und 50 Prozent *spin-down*. Führt man nun eine Messung der Spinausrichtung durch, so erhält man ein zufälliges Resultat,

entweder *spin-up* oder *spin-down*. Führt man die Messung mit 10000 Atomen durch, so erhält man ungefähr je 5000 Atome mit *spin-up* und *spin-down*. Dies ist aber kein genaues Ergebnis: Auch bei 10000 Münzwürfen erhält man nicht genau 5000-mal Kopf und Zahl, sondern ein leicht abweichendes Ergebnis. Die typische Abweichung entspricht dem so genannten Schrotrauschen und entspricht der Quadratwurzel der Teilchenzahl, in unserem Fall also $\sqrt{10000}=100$. Dieses sogenannte Quantenrauschen kann im Gegensatz zu technischem Rauschen nicht unterdrückt werden und stellt eine wesentliche Limitierung von Präzisionsmessungen dar.

Verschränkung

Um das Konzept der Verschränkung zu verstehen, muss man zwei Atome betrachten. Beide seien je in einem 50/50 Überlagerungszustand in *spin-up* und *spin-down*, und ihre Messergebnisse entsprechend zufällig. Sind die beiden Atome nun aber verschränkt, so legt sich der quantenmechanische Zustand des einen Atoms bereits durch eine Messung des anderen fest. Misst man beim ersten Atom also *spin-up*, so weiß man mit Sicherheit, dass das andere Atom im Zustand *spin-down* ist. Bei einem verschränkten Atompaar ist diese Korrelation der Messergebnis-

se wiederum unabhängig von der Achse, entlang der die Spinausrichtung gemessen wird. Es wird gleich offensichtlich, dass durch solche verschränkten Paare das Schrotrauschen unterboten werden kann, da die Messergebnisse zwar zufällig sind, aber zu jedem *spin-up* auf jeden Fall genau ein *spin-down* gehört. Im Folgenden wird beschrieben, wie mit der Hilfe verschränkter Atome Präzisionsmessungen verbessert werden können.

Das Konzept der Verschränkung widerstrebt nicht nur unserer Lebenserfahrung, auch unter den Physikern wurden die Konsequenzen lange diskutiert. Einstein diskreditierte die Verschränkung als »spukhafte Fernwirkung«. In einem berühmten Artikel gemeinsam mit Podolsky und Rosen¹ betrachtete er zwei räumlich getrennte, verschränkte Teilchen. Die Autoren standen der quantenmechanischen Beschreibung skeptisch gegenüber, da sie beweisen konnten, dass dadurch bisher unumstößliche Grundlagen der Physik aufgegeben werden müssten.

In den letzten Jahrzehnten konnte die Existenz der Verschränkung in vielen experimentellen Realisierungen bewiesen werden und damit Einsteins Skepsis weitgehend widerlegt werden. Verschränkung ist heute vielmehr ein wertvolles Werkzeug, um einzigartige Anwendungen zu

erschließen. So können damit sogenannte Quantencomputer gebaut werden, die fundamental besser als herkömmliche Computer sind. Außerdem können Informationsübertragungen mit nahezu perfekter Sicherheit ermöglicht werden. Verschränkte Modellsysteme können verwendet werden, um damit andere, bisher unverstandene physikalische Systeme zu simulieren. Des Weiteren, und dies ist das

und mithilfe einer Hochfrequenz oder einer optischen Frequenz in einen 50/50-Überlagerungszustand gebracht. Nach einer Wartezeit wird der Vorgang invertiert. Für eine sehr kurze Wartezeit kehren die Atome daher in den ursprünglichen Spinzustand zurück. Ansonsten hängt das Ergebnis vom Produkt aus der Wartezeit und dem Energieunterschied der beiden Zustände ab. Somit kann man

getrennt werden. Sind sie in verschiedenen Höhen des Gravitationspotentials, kann die **Gravitation** gemessen werden, haben sie unterschiedliche Geschwindigkeiten, können **Beschleunigung** oder **Rotation** bestimmt werden (→ Artikel 2). Aber all diesen Messungen ist gemein, dass die bestmögliche Präzision der Messungen durch das Schrotrauschen limitiert ist. Die Schrotrauschgrenze kann

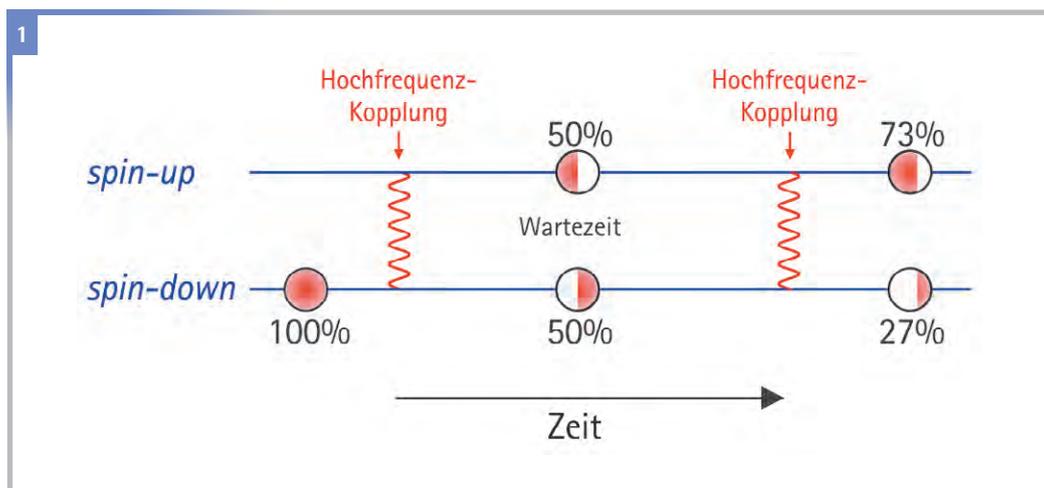


Abbildung 1
Funktionsweise eines Atominterferometers. Ein Atom wird in einen Überlagerungszustand aus spin-up und spin-down gebracht. Während der Wartezeit ist das Atom sensitiv auf die zu messende Größe. Abhängig von deren Wert ändert sich das Verhältnis am Ausgang.

Thema dieses Artikels, ermöglicht die Verschränkung Präzisionsmessungen mit besserer Auflösung, da das Schrotrauschen alle Messungen ohne Verschränkung fundamental limitiert. Aus diesem Grund hat sich die Europäische Union entschieden, im Rahmen ihrer *Quantum Technologies*-Initiative eine Milliarde Euro in die Entwicklung von Grundlagen und Anwendungen von Verschränkung und ähnlichen Quantentechnologien zu investieren.

Atominterferometrie und Verschränkung

Atome mit zwei Spinzuständen können für Präzisionsmessungen genutzt werden. In solchen Atominterferometern (siehe Abbildung 1) werden die Atome in einem der beiden Spinzustände präpariert

mit einer Messung des prozentualen Anteils in den beiden Zuständen entweder die Zeit oder den Energieunterschied bestimmen, wenn das jeweils andere bekannt ist. Unsere Einheit der Zeit, die Sekunde, ist definiert über einen gegebenen Energieunterschied zwischen zwei Spinzuständen im Cäsiumatom, der dann eine präzise Messung der **Zeit** erlaubt (→ Artikel 8). Dies ist das Grundprinzip aller Atomuhren, die derzeit die Basis unserer Weltzeit darstellen.

Ist die Wartezeit im Atominterferometer ausreichend genau bekannt, kann auch der Energieabstand bestimmt werden. Hängt dieser beispielsweise vom **Magnetfeld** ab, so kann auf diese Weise das Magnetfeld bestimmt werden. Alternativ können die beiden Spinzustände auch räumlich

nur durch die Verwendung verschränkter Atome überwunden werden.

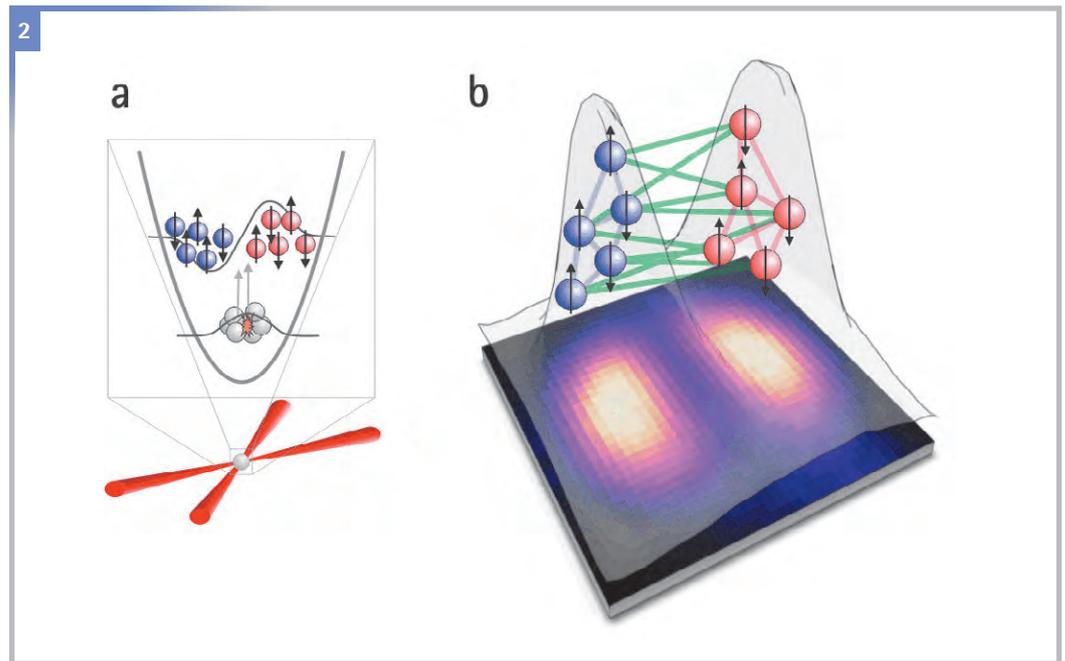
Erzeugung verschränkter Atome

Es ist daher nicht verwunderlich, dass in mehreren Gruppen weltweit an der Erzeugung verschränkter Atome geforscht wird². Das Institut für Quantenoptik ist dabei auf ultrakalte Atome in sogenannten Bose-Einstein-Kondensaten spezialisiert. In Bose-Einstein-Kondensaten sind die Atome so kalt, dass sie ununterscheidbar werden: am selben Ort, im selben quantenmechanischen Zustand, ganz wie die Lichtteilchen in einem Laser ununterscheidbar sind. Die Atome werden innerhalb eines Vakuumsystems in einer wenige Mikrometer großen Wolke in einem

Abbildung 2

a Die Atome werden im Fokus von zwei Laserstrahlen festgehalten. Hier können sie stoßen und Paare von Atomen mit *spin-up* (Pfeil nach oben) und *spin-down* (Pfeil nach unten) erzeugen. Sie werden hier in einer angeregten räumlichen Mode erzeugt, sodass sich die Wolke in einen linken (blau) und einen rechten (rot) Teil trennt.

b Gemessenes Dichteprofil der Atomwolke, die sich klar in links und rechts aufteilt. Die Verbindungslinien symbolisieren die Verschränkung zwischen den Atomen.



solchen Bose-Einstein-Kondensat präpariert und im Fokus von zwei Laserstrahlen festgehalten (siehe Abbildung 2a). Nun können je zwei Atome in der Wolke aneinander stoßen und so in ein Atompaar in den beiden gewünschten *spin-up* und *spin-down* Zuständen übergehen. Aufgrund der Energieerhaltung muss zu jedem *spin-up*-Atom auch immer ein *spin-down*-Atom generiert werden. So können atomare Wolken mit exakt der gleichen Anzahl von *spin-up* und *spin-down*-Atomen erzeugt werden – ein sogenannter Twin-Fock-Zustand. Da die Atome ununterscheidbar sind, muss eine solche Wolke aus miteinander verschränkten Atomen bestehen.

Im Jahr 2011 konnte am Institut für Quantenoptik bewiesen werden, dass der erzeugte Zustand tatsächlich verschränkt ist, und dass er für die Präzisionsinterferometrie jenseits der Schrotrauschgrenze tatsächlich geeignet ist³. Mit derselben Verschränkungserzeugung gelang 2016 in Hannover die Demonstration einer prototypischen Atomuhr, die von der Ver-

schränkung profitiert⁴. Nichtsdestotrotz waren alle diese Ergebnisse auf interne Spin-zustände beschränkt, ein Nachweis der Verschränkung zwischen räumlich getrennten atomaren Wolken war bisher nicht gelungen. Aber nur räumlich getrennte, verschränkte Atome können für eine verbesserte Messung der Gravitation, der Beschleunigung und der Rotation genutzt werden.

Aktuell ist es am Institut für Quantenoptik erstmalig gelungen, den erzeugten Twin-Fock-Zustand in zwei räumlich getrennte Wolken aufzuteilen und die Verschränkung zwischen den beiden Wolken direkt nachzuweisen⁵. Dazu wurden die verschränkten Atome in einem angeregten räumlichen Zustand erzeugt. Das bedeutet, dass die Atome in einer zweigeteilten Wolke präpariert wurden (siehe Abbildung 2b). Hier wiederum ist jedes Atom in beiden Wolken – zu je 50 Prozent in der rechten und in der linken Wolke. Erst durch eine Messung wird dann festgelegt, in welcher Wolke das Atom tatsächlich ist. Nun konnte bei jedem

Atom gemessen werden, ob es rechts oder links und ob es *spin-up* oder *spin-down* war. Diese Messergebnisse konnten dann mit einem Kriterium verglichen werden, das gemeinsam mit theoretischen Physikern in Bilbao speziell entwickelt worden war. Dieses Kriterium konnte nun verwendet werden, um zweifelsfrei nachzuweisen, dass die Atome in der linken Wolke mit den Atomen der rechten Wolke verschränkt sein müssen. Die linke Wolke hat also tatsächlich eine spukhafte Fernwirkung auf die rechte Wolke. Parallel zu den Arbeiten in Hannover wurden entsprechende Ergebnisse mit anderen Methoden durch Arbeitsgruppen in Heidelberg und Basel erzielt. Alle drei Arbeiten wurden gemeinsam im renommierten Wissenschaftsjournal *Science* publiziert⁵⁻⁷.

Zukunft in HITec

In der Zukunft sollen die verschränkten Wolken noch viel weiter räumlich separiert werden. In HITec existiert im *Very-Long Baseline Atom Interferometer* (VLBAI → Artikel 2) die

Möglichkeit, die Verschränkung auch auf riesigen Abständen auf der Meterskala herzustellen. Dazu werden die Atomwolken im freien Fall in einer 10 Meter hohen Vakuumröhre mit Laserstrahlen aufgeteilt und wieder zusammengeführt. Dies ermöglicht neuartige Tests, die überprüfen können, ob die Quantenmechanik auch für solch makroskopische Objekte gültig ist. Außerdem können die verschränkten Atome in Zukunft eingesetzt werden, um die geplanten Präzisionsmessungen am VLBAI noch genauer zu machen. Eine wichtige Anwendung in der Zukunft wird die mögliche Detektion von Gravitationswellen mit atomaren Interferometern. So könnte Einsteins spukhafte Fernwirkung dazu beitragen, die von ihm vorhergesagten Gravitationswellen noch besser zu detektieren.



Apl. Prof. Dr. Carsten Klempt
Jahrgang 1976, ist seit 2016 außerplanmäßiger Professor an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2016 ist er ebenfalls Mitglied des Vorstands des Sonderforschungsbereichs 1227 »Designed quantum states of matter« (DQ-mat). Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Quanten-Atomoptik, der Atominterferometrie, und der Ultrakalten Quantengase.
Kontakt: klempt@iqo.uni-hannover.de



Prof. Dr. Wolfgang Ertmer
Jahrgang 1949, ist seit 1994 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Von 1997 bis 2009 war er Sprecher des SFB 407 »Quantenlimitierte Meßprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen«, von 2007 bis 2014 war er Sprecher des Exzellenz Clusters »Quantum Engineering and Space-Time Research« (QUEST). Seit Gründung ist er Sprecher des HITec-Vorstands.
Kontakt: ertmer@iqo.uni-hannover.de

WILLST DU AUCH IN DIE CHAMPIONS LEAGUE DES MESSENS?



*Karolin Stams,
Internationale Zusammenarbeit, PTB*

WISSENSCHAFT
INFORMATIK
TECHNIK



Informiere Dich über Deine beruflichen Möglichkeiten unter www.ptb.de

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
das nationale Metrologieinstitut in Braunschweig und Berlin.

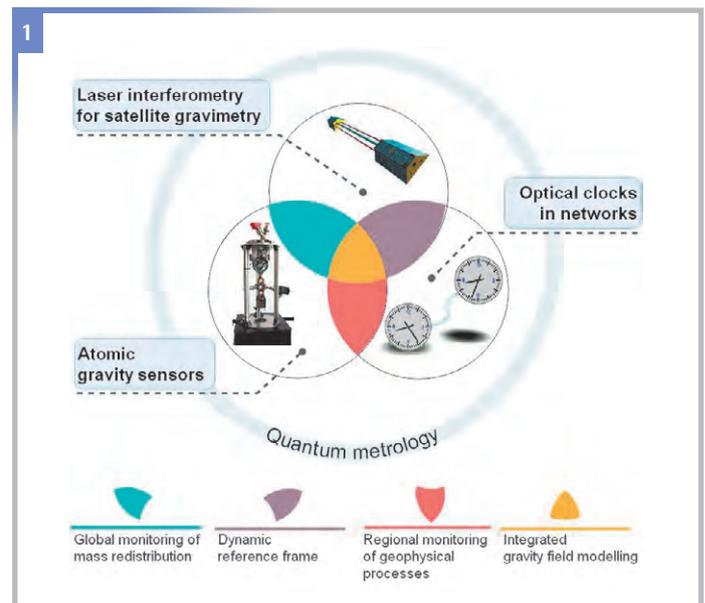


Die Vermessung der Erde

NEUE METHODEN ZUR BEOBACHTUNG VON MASSENVARIIATIONEN

An den Fakultäten für Bauingenieurwesen und Geodäsie und für Mathematik und Physik angesiedelt, nutzt der Sonderforschungsbereich (SFB) 1128 »Relativistische Geodäsie und Gravimetrie mit Quantensensoren« (geo-Q) die Grundlagen der Quantenphysik, um neue Beobachtungsverfahren und Instrumente für geodätische Anwendungen zu entwickeln. Ein großer Teil der Technologie-Entwicklungen wird nun in den HITec-Laboren vorangetrieben.

Das Schwerefeld der Erde stellt eine der wichtigsten Bezugsgrößen für die globale Positionierung und zur Überwachung von gravimetrischen Prozessen im System Erde dar. Jedes Messinstrument, das zum Beispiel mithilfe einer Libelle (Hilfsmittel zum Horizontieren von Geräten ähnlich einer Wasserwaage) senkrecht aufgestellt wird, richtet sich automatisch nach der Lotlinie auf das Schwerefeld aus. Als Referenzfläche wird dabei das sogenannte Geoid definiert, eine Fläche konstanten Schwerepotenzials (Äquipotenzialfläche). Das Geoid entspricht etwa der mittleren Meeresoberfläche in Ruhe, die man sich gedanklich unter den Kontinenten fortgesetzt vorstellen kann. Praktisch konnte diese Fläche bisher nicht direkt beobachtet werden, sondern das Geoid wurde indirekt aus Satellitenbeobachtungen und terrestrischen Messungen mit Gravimetern abgeleitet. Trotzdem stellt es die wichtigste Bezugsfläche für alle Arten von Höhensystemen dar, da Äquipotenzialflächen eindeutig definieren, in welche Richtung Wasser fließt. Die globale Vereinheitlichung existierender Höhensysteme stellt eine der größten Herausforderungen der modernen Geodäsie dar. In den letzten Jahrzehnten konnten mithilfe immer besserer Verfahren auch zeitliche Variationen des Schwerefeldes bestimmt werden, die etwa durch das Abschmelzen kontinentaler Eismassen, durch



Meeresspiegelvariationen oder Änderungen im Grundwasser verursacht werden. Damit stehen der Klima- und Erdsystemforschung ganz neue Methoden und Beobachtungsgrößen zur Verfügung.

Schwerefeldbestimmung mit Quantensensoren

Im Sonderforschungsbereich geo-Q werden Verfahren entwickelt, um das Schwerefeld der Erde auf nahezu allen räumlichen und zeitlichen Skalen noch besser erfassen zu können. Globale Schwerefeldinformationen werden aus Satellitenmessungen abgeleitet, wozu optische Methoden (Stichwort Laserinterferometrie) zur Abstandsmessung zwischen Satelliten oder auch

zwischen Testmassen in einem Satelliten entwickelt werden. Hier profitiert man von der Grundlagenforschung am Albert-Einstein-Institut (AEI) im Zusammenhang mit der Gravitationswellendetektion.

Das regionale und lokale Schwerefeld kann mit terrestrischen gravimetrischen Messmethoden erfasst werden. Neuartige Gravimeter, Quanten-Gravimeter, nutzen die Atominterferometrie, um punktweise Schwerewerte zu bestimmen. Damit lassen sich schnell kleinräumige Massenvariationen, zum Beispiel im Grundwasser, beobachten. Präzise optische Uhren können im Sinne der relativistischen Geodäsie (siehe unten) genutzt werden, um die ter-

restrische Schwerfeldbestimmung zu unterstützen. Vor allem dienen sie aber dazu, physikalische Höhen und das Geoid über große Entfernungen abzuleiten.

Optische Uhren, Atom- und Laserinterferometrie sind drei Komponenten der Quantenmetrologie, die in HITec weiter erforscht werden und die Eckpfeiler des Sonderforschungsbereichs geo-Q bilden.

der Messwerte aufgrund der Ermüdung der Materialien. Ein radikal neuer Ansatz sind Quantengravimeter, bei denen fallende Atomwolken statt dem Fall einer großen Testmasse analysiert werden. Um ein homogenes und vor allem präzise messbares Objekt zu haben, muss eine solche Atomwolke auf unter einen mikro-Kelvin über dem absoluten Nullpunkt heruntergekühlt werden – es entsteht ein

vergleichsweise groß und aufwendig zu transportieren, jedoch wurde innerhalb des Forschungsvorhabens bereits gezeigt, dass mithilfe von Atomchips eine Miniaturisierung möglich ist. Zukünftige Instrumente können also sehr viel kleiner ausfallen und sind damit leicht zu transportieren und billiger zu produzieren. Der besondere Vorteil ist hierbei, dass diese Instrumente drifffrei sind, da keine mechanische Ermüdung mehr eintreten kann. Mit diesen Instrumenten lassen sich völlig neue gravimetrische Messkonzepte realisieren.

Relativistische Geodäsie mit optischen Atomuhren

Albert Einstein postulierte mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie, dass Uhren unterschiedlich schnell ticken, abhängig vom Abstand zu großen Massen. Uhren an der Erdoberfläche laufen langsamer als Uhren, die weiter entfernt sind. Man kann also aus dem Gangunterschied zweier hochpräziser Uhren die Höhendifferenz ermitteln. Diese Methode der »relativistischen Geodäsie« bietet neue Möglichkeiten der Höhen- und Schwerfeldbestimmung. Sie erfordert aber hochpräzise Atomuhren, die durch Glasfaserkabel miteinander verbunden sind. Ein Höhenunterschied von einem 1 cm entspricht dabei einem relativen Frequenzunterschied zweier Uhren von 10^{-18} . Das Verfahren wird auch als chronometrisches Nivellement bezeichnet.

Optische Atomuhren sind hochkomplizierte Apparaturen und waren bislang nur in den Laboren einiger großer Forschungsinstitute zu finden. Die transportable optische Strontiumuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB, PD Dr. Christian Lisdat) eröffnet jetzt erstmals die Möglichkeit für Messungen »im Feld«.

Abbildung 1
Schematische Darstellung der Eckpfeiler des Sonderforschungsbereichs geo-Q: Atom- und Laserinterferometrie sowie Uhren erlauben eine genaue Messung des Erdschwerfeldes.

Abbildung 2
Messkopf des transportablen Quantengravimeters QG-1: Zu sehen ist das Vakuumsystem, in dem Bose-Einstein-Kondensate erzeugt werden, um das Schwerfeld der Erde zu messen.



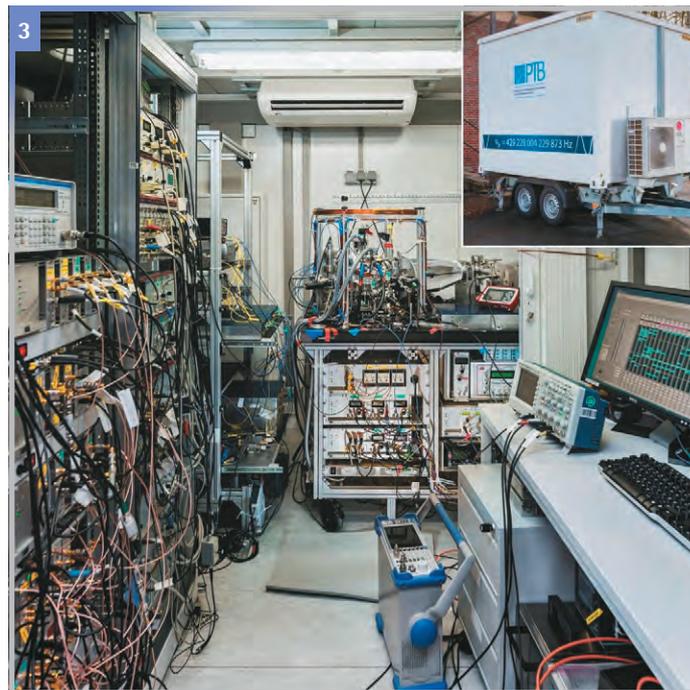
Quantengravimetrie

Klassische Gravimeter sind durch ihre mechanischen Komponenten begrenzt und unterliegen Fehlereinflüssen, wie zum Beispiel einer Drift

sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat. Das Quantengravimeter QG-1 ist der Prototyp eines solchen Instruments und wird zurzeit am Institut für Quantenoptik entwickelt. Noch sind die Instrumente

Abbildung 3
Der transportable Messcontainer der PTB und ein Blick in das Innenleben des Containers: Die optische Uhr ist mittig auf dem Messtisch zu sehen.

Foto: PD Dr. Christian Lisdat (PTB)

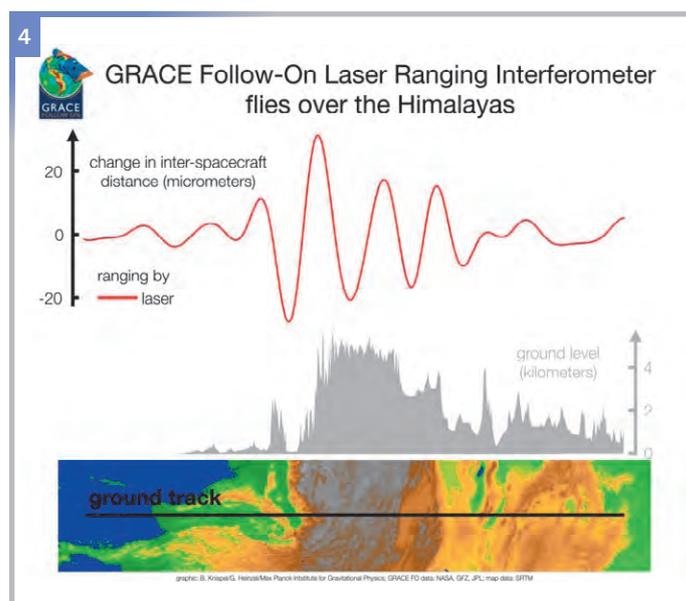


Für eine Messkampagne, die von Experten aus England, Italien und Deutschland durchgeführt wurde, ist die Strontiumuhr ins Modane Underground Laboratory im Fréjus-Tunnel zwischen Frankreich und Italien gefahren worden. Dort maß das Team die Differenz der Gravitationspotenziale zwischen dem Standort der Uhr im Inneren des Berges und

einer zweiten Uhr im 90 Kilometer entfernten Turin. Parallel wurde die Gravitationspotenzialdifferenz zwischen den Uhren mit konventionellen geodätischen Messmethoden bestimmt. Die Auswertung zeigte, dass die Ergebnisse beider Messungen konsistent waren – ein Meilenstein in der Entwicklung transportabler optischer Uhren.

Abbildung 4
Abstandsvariationen aufgrund der Massenanziehung des Himalayagebirges (oben), die Topographie und die Bodenspur des Satelliten im Bild unten.

Foto: aus der Pressemitteilung des Albert-Einstein-Institut Hannover vom 2. Juli 2018



Die neuen optischen Uhren haben somit das Potenzial, geodätische Höhenmessungen zu revolutionieren und einige Beschränkungen der traditionellen geodätischen Techniken zu überwinden. Vor allem für die Etablierung eines weltweit einheitlichen Höhenreferenzsystems eröffnet die Methode ganz neue Möglichkeiten. Um die transportablen optischen Uhren tatsächlich in der Praxis einzusetzen, müssen sie allerdings noch die gewünschte Genauigkeit von 1 cm im Feldeinsatz erreichen.

Abstandsmessungen zwischen Satelliten mittels Laserinterferometrie

Quantengravimeter und optische Uhren erlauben es, lokale Messungen durchzuführen. Um aber ein globales Bild des Schwerefeldes und seiner zeitlichen Variationen zu bekommen, bedarf es Satellitenmessungen. Das Prinzip ist dabei recht einfach: Zwei Satelliten bewegen sich im freien Fall im Schwerefeld der Erde. Durch dessen räumliche und zeitliche Variationen ändern die beiden Satelliten kontinuierlich ihren Abstand. Misst man nun diese Abstandsänderung, kann man das Schwerefeld ableiten. Die Genauigkeit der Abstandsmessung bestimmt dabei die Qualität des berechneten Schwerefeldes – je genauer die Messung zwischen den Satelliten, desto hochauflösender und zuverlässiger ist die Bestimmung.

Das Prinzip wurde mit der Satellitenmission GRACE im Jahr 2002 erstmals umgesetzt, damals noch mit einem Mikrowellenmessgerät zur Abstandsmessung, mit dem man eine Genauigkeit von etwa 10 µm erreichte. Für die Nachfolgemission GRACE Follow-On wurde vom Albert-Einstein-Institut Hannover ein Laserinterferometer – kurz LRI (Laser Ranging Interfero-

meter) genannt – entwickelt, das bei dieser Mission noch zusätzlich zur bestehenden Mikrowellentechnologie eingesetzt wird. Das System soll so zunächst auf seine Weltalltauglichkeit getestet werden. Die Satelliten wurden am 22. Mai 2018 erfolgreich gestartet und seit dem 14. Juni 2018 liefert das LRI Messdaten von hervorragender Qualität. Gegenüber der Mikrowellentechnologie wird eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 10 erwartet (also im sub- μm -Bereich für Abstände von 200 km). Sollte das System seine Zuverlässigkeit beweisen, wird es bei allen zukünftigen Schwerefeldmissionen zum Einsatz kommen.

Zur Bestimmung der zeitlichen Variationen des Schwerefeldes der Erde werden Messdaten eines Monats gesammelt und ausgewertet. So erhält man monatliche Karten des Erdschwerefeldes, die sich besonders eignen, um die Wasserressourcen zu verfolgen, das Abschmelzen der Eismassen der alpinen Gletscher und der polaren Eisschilde zu studieren und deren Beitrag zum Meeresspiegelanstieg quantifizieren. Tatsächlich ist es momentan die einzige Methode, um global den Grundwasserspiegel bestimmen zu können. Mithilfe solcher Messungen konnte das massive Absinken des Grundwasserspiegels in Nordwestindien und das Abschmelzen des Grönland-Eises registriert werden.

Fazit/Ausblick

Die Quantenmetrologie ist momentan dabei, die Beobachtungsverfahren der physikalischen Geodäsie zu revolutionieren. Schranken, die bisher bessere und genauere Beobachtungen verhinderten, werden durch die neuen quantenbasierten Methoden durchbrochen und es ist sicher, dass diese Verfahren in

Zukunft klassische Instrumente ersetzen werden. Im HITec-Gebäude werden dazu wichtige Komponenten entwickelt. Gleichzeitig erschließen sich durch die gesteigerte Genauigkeit neue Anwendungsfelder, zum Beispiel bei der Bestimmung und Überwachung von Massenvariationen als zentrale Indikatoren des Klimawandels und als Grundlage für das Ressourcenmanagement. Die Ressource Wasser wird in Zukunft eine immer wichtigere Rolle einnehmen, da durch extensiven Wasserverbrauch die natürlichen Speicher immer stärker unter Druck geraten. Profiteur der neuen Technologien sind somit alle Bereiche unserer Gesellschaft, da ein besseres Wassermanagement sowohl eine bessere Planbarkeit für die Landwirtschaft und die Industrie bedeutet als auch einen schonenden Umgang mit der Natur und Umwelt ermöglicht. Der Forschungsverbund geo-Q ist ein gelungenes Beispiel für die fächerübergreifende Zusammenarbeit zwischen der Physik und der Geodäsie an der Leibniz Universität Hannover. Die Grundlagenforschung der Physik wird dabei direkt in die praxisnahe Anwendung der Geodäsie überführt. Das stellt den Idealfall moderner Forschung dar.



Dr. Matthias Weigelt

Jahrgang 1976, ist seit 2016 am Institut für Erdmessung und einer der beiden Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 1128 – Relativistische Geodäsie und Gravimetrie mit Quantensensoren (geo-Q). Seine Forschungsinteressen liegen in der globalen zeitvariablen Schwerefeldbestimmung und der Kombination von satellitengestützten und terrestrischen Beobachtungen. Kontakt: weigelt@ife.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller

Jahrgang 1962, ist Direktor des Instituts für Erdmessung und Sprecher des Sonderforschungsbereichs 1128 – Relativistische Geodäsie und Gravimetrie mit Quantensensoren (geo-Q). Seine Forschungsinteressen liegen in der terrestrischen und Satelliten-basierten Gravimetrie, insbesondere in der Entwicklung neuer Konzepte zur gravimetrischen Erdbeobachtung. Ein weiterer Schwerpunkt umfasst die Analyse von Lasermessungen zum Mond zum Test der Allgemeinen Relativitätstheorie. Kontakt: mueller@ife.uni-hannover.de



Dr. Fumiko Kawazoe

Jahrgang 1980, ist seit 2010 am Institut für Gravitationsphysik und eine der beiden Geschäftsführerinnen des Sonderforschungsbereichs 1128 – Relativistische Geodäsie und Gravimetrie mit Quantensensoren (geo-Q). Ihre Interessen liegen in der Laserinterferometrie und der modernen Ausbildung von Doktoranden. Kontakt: fumiko.kawazoe@aei.mpg.de



Prof. Dr. Karsten Danzmann

Jahrgang 1955, ist Direktor des Instituts für Gravitationsphysik und Stellvertretender Sprecher des Sonderforschungsbereichs 1128 – Relativistische Geodäsie und Gravimetrie mit Quantensensoren (geo-Q). Seine Forschungsinteressen liegen in der laserinterferometrischen Abstandsmessung und ihrer Anwendung in der Gravitationswellenastronomie und Geodäsie. Kontakt: danzmann@aei.mpg.de

QUANOMET

EINE FORSCHUNGSLINIE DER STRATEGISCHEN ALLIANZ BRAUNSCHWEIG – HANNOVER

Die Quanten- und Nanometrologie (QUANOMET) verfolgt die methodische Weiterentwicklung und Innovation immer präziserer und empfindlicherer Messverfahren und ist eine von drei Forschungslinien eines Wissenschaftsbündnisses zwischen der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig. Wissenschaftler beider Hochschulen berichten, wie das Projekt entstanden ist und welche Ziele es hat.

Mit der im März 2015 initiierten Masterplanung der Forschungsregion Braunschweig-Hannover wurde ein neuer Weg beschritten, um die beteiligten Hochschulen im nationalen und internationalen Wettbewerb zukunftssicher aufzustellen. Die strategische Förderung des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur (MWK) ermöglichte den beteiligten Hochschulen TU Braunschweig und Leibniz Universität Hannover eine besondere Kooperation, die auf gemeinsame Projekte in Forschung, Lehre, Studium und Aus- und Weiterbildung abzielt. Besondere Bedeutung hat hierbei die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie die Gewinnung international herausragend qualifizierter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Ziel der Zusammenarbeit ist, die wissenschaftliche Exzellenz beider Universitäten auf besonderen Forschungsfeldern (Forschungslinien), die sich nicht nur durch wissenschaftliche, sondern auch durch weitreichende gesellschaftliche und ökonomische Relevanz auszeichnen, weiterzuentwickeln. Die Wissenschaftsallianz Braunschweig-Hannover erstreckt sich daher auf drei gemeinsame Forschungslinien: Mobilität, Lebenswissenschaften und Quanten- und Nanometrologie (QUANOMET).

Mobilise – Forschungslinie Mobilität

Das Ziel der Forschungslinie »Mobilise« ist es, die Mobilität der Zukunft zu planen und zu gestalten sowie wissenschaftlich und interdisziplinär zu begleiten. Im Rahmen zahlreicher Projekte aus den Themenfeldern Digitalisierung, Energiewende sowie Produktion und Leichtbau entwickeln die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Lösungsansätze für aktuelle gesellschaftliche, ökologische, technologische und wirtschaftliche Herausforderungen. Mit der Forschungslinie »Mobilise« wird die Grundlage für einen weiteren Ausbau der Mobilitätsforschung gelegt. Da zukünftige Innovationen insbesondere an den Grenzen zwischen den verschiedenen Disziplinen zu erwarten sind, wird vor allem die interdisziplinäre Zusammenarbeit gestärkt.

Smart BioTecs – Forschungslinie Lebenswissenschaften:

In der Forschungslinie »Smart BioTecs« stehen die Entwicklung und Herstellung neuartiger Wirkstoffe und Arzneimittel, aber auch intelligenter Implantate zur Behandlung von körperlichen Defekten und zur Unterstützung der körperlichen Regeneration im Mittelpunkt. Dazu werden die Forschungsprofile der Universitäten im Bereich der Lebenswissenschaften geschärft und daraus entstehende Synergieeffekte genutzt.

QUANOMET – Forschungslinie Quanten- und Nanometrologie:

Metrologie ist die Wissenschaft vom präzisen Messen. Die Entwicklung metrologischer Verfahren gehört zu den wichtigsten Grundlagen moderner Industriegesellschaften mit erheblicher Relevanz für so unterschiedliche Bereiche wie



beispielsweise eine verbesserte medizinische Diagnostik oder auch die Klimaforschung. Mit der Forschungslinie »QUANOMET« wird die interdisziplinäre wissenschaftliche Zusammenarbeit im Bereich der Nano- und Quantentechnologie gefördert.

Die im Folgenden beschriebene Forschungslinie QUANOMET wurde von den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in einem »Bottom-up«-Prozess entworfen und gemeinsam mit den beteiligten Präsidien etabliert. Hierbei ist auch die Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) als eines der weltweit führenden staatlichen Metrologieinstitute von Beginn an konstitutiv gewesen. QUANOMET verfolgt die methodische Weiterentwicklung und Innovation immer präziserer und empfindlicherer Messverfahren, bei denen das besondere Potenzial der Quanten- und Nanowissenschaften ausgeschöpft werden soll. QUANOMET hat hierdurch einen stark interdisziplinären Charakter, der nachhaltig zu einer immer stärkeren Verschränkung zwischen beiden Universitäten führen wird. Dies wird dadurch unterstützt, dass beide Standorte mit neuen beziehungsweise im Bau befindlichen Forschungsbauten und Forschungszentren über eine einzigartige Infrastruktur verfügen:

- Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE) ist ein Forschungszentrum der Leibniz Universität Hannover und betreibt ein 2009 eröffnetes Forschungsgebäude mit Laboren, Geräten und insbesondere Reinräumen, die Mitgliedsorganisationen zur Verfügung stehen.
- Das im Juli 2018 eröffnete Hannover Institute of Technology (HITEc), bietet modernste Laborinfrastruktur und einzigartige Großgeräte für über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Physik und den Ingenieurwissenschaften.
- Im Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA) der Technischen Universität Braunschweig werden Forschende aus der Elektrotechnik, der Physik, dem Maschinenbau und der Chemie gemeinsam mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mithilfe modernster technischer Infrastruktur an wichtigen Fragen des Messens in der Nanowelt arbeiten (geplante Eröffnung Herbst 2018).

QUANOMET ist es gelungen, einen international herausragenden Forschungsverbund der Metrologie zu etablieren, der mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), dem zweitgrößten Metrologie-

Institut der Welt, einen starken Partner an seiner Seite hat, der sowohl mit der Technischen Universität Braunschweig als auch mit der Leibniz Universität Hannover schon jetzt vielfältig strukturell und personell verbunden ist.

Der interdisziplinäre Forschungsschwerpunkt QUANOMET wirkt darüber hinaus auch stark in andere fachliche Bereiche hinein, die von den hier entwickelten Methoden und Konzepten erheblich profitieren werden. Die Forschung in QUANOMET gliedert sich in drei Forschungsknoten: NanoParticles, NanoLight und QuantumTechniques. Jeder Forschungsknoten besteht wiederum aus unabhängigen Nachwuchgruppen.

Perspektiven der Quanten- und Nanometrologie

Die Erweiterung unseres wissenschaftlichen Erkenntnishorizonts basiert in den allermeisten Fällen auf immer präziseren Experimenten zur Erforschung der uns umgebenden Vorgänge und Objekte. Damit ist die Weiterentwicklung der Metrologie als der Wissenschaft vom präzisen Messen und deren Anwendung eine wichtige Grundlage sowohl erkenntnisgeleiteter Wissenschaft als auch technisch-wissenschaftlichen Fortschritts.



Abbildung 1
Das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE), das Hannover Institute of Technology (HITEc) in Hannover und das Laboratory of Emerging Nanometrology (LENA) in Braunschweig sind der Kern der Forschungsinfrastruktur von QUANOMET. Die Forschungszentren verfügen über modernste Analyse- und Forschungsgrößgeräte, die allen QUANOEMT-Forschenden zur Verfügung stehen.

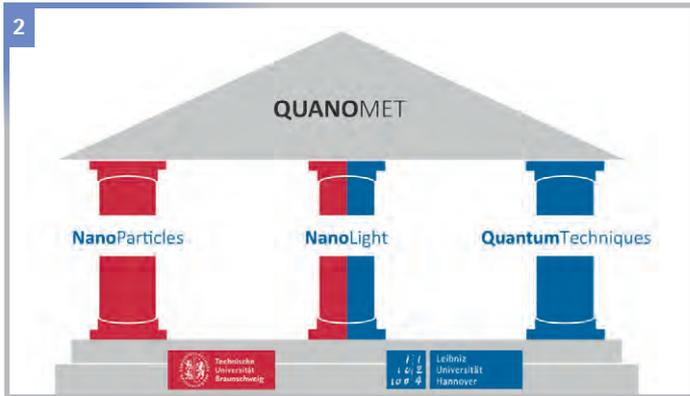


Abbildung 2
Die gemeinsame Forschung bei der Hochschulen gliedert sich in drei Forschungsknoten: NanoParticles, NanoLight und QuantumTechniques. Diese unterteilen sich wiederum in weitere unabhängige Nachwuchsgruppen.

Besonders prominente Beispiele für die enge Verbindung zwischen Metrologie und Fortschritten in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung wurden durch Nobelpreise ausgezeichnet: Klaus von Klitzing (Präzisionsmessung des Hall-Widerstands, Nobelpreis 1985), Theodor Hänsch (Präzisionsmessung der Frequenz von Licht, dadurch Entdeckung von Exoplaneten, Nobelpreis 2005), Stefan Hell (optische Präzisionsmikroskopie, dadurch direkte optische Abbildung von Molekülen, Nobelpreis 2014) und zuletzt (2017) Rainer Weiss, Barry C. Barish und Kip S. Thorne für den direkten Nachweis von Gravitationswellen. In all diesen Beispielen sind die Grenzen des Messbaren und damit auch unser Erkenntnishorizont signifikant verschoben worden.

Abbildung 3
nanoLEDs lassen sich einzeln ansteuern. In eine Matrix angeordnet, bilden sie ein LED-Array.

Die Anforderungen an die Metrologie und im Besonderen der Quantenmetrologie

sind im Allgemeinen äußerst komplex, insbesondere, weil für deren Weiterentwicklung eine massiv interdisziplinäre Herangehensweise erforderlich ist. Dabei spielen die wissenschaftlichen Methoden der Quantenphysik nicht nur beim Messvorgang selbst, sondern mittlerweile auch bei der Neudefinition des Internationalen Systems der Einheiten, SI oder bei der Entwicklung neuer Sensoren eine zunehmend zentrale Rolle.

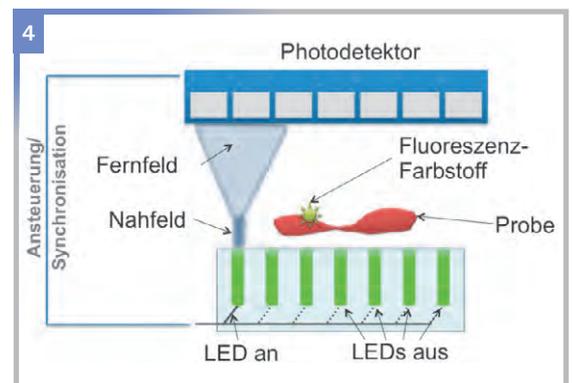
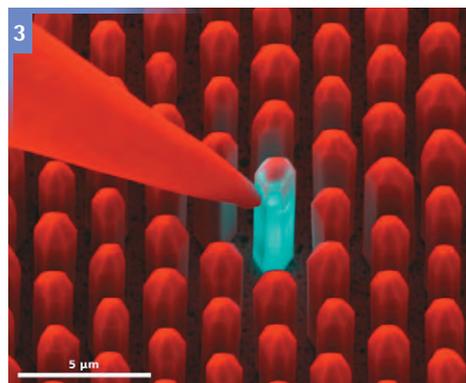
Zeit- und Frequenzmessung über große räumliche Distanzen, Gravitationswellendetektoren wie zum Beispiel der Detektor GEO600 bei Hannover, Erdbeobachtungssatelliten zur Bestimmung von Schmelzprozessen großer Eismassen oder der Veränderung des globalen Grundwasserspiegels, aber auch Atomuhren der neuesten Generation mit Unsicherheiten im Bereich von 10 bis 18 Stellen hinter dem Komma sowie Anwendungen zur Vermessung des Erdgravitationsfeldes und dessen Dynamik, sind exzellente Beispiele für die Verbindung von Quantenphysik mit der Metrologie makroskopischer Objekte.

Die Anwendung quantenphysikalischer Konzepte auf nanoskalige Objekte ist eine besondere Herausforderung, da hier die Messsonde (zum Beispiel das Photon, das Elektron, das Atom) nicht mehr eindeutig vom zu messenden Objekt zu

trennen ist. Einzelelektronen-Transistoren als Quantenstandard für Strom, Einzelphotonenemitter als Quantenstandard für die Candela (SI-Einheit für die Lichtstärke) oder Einzelmolekül-Detektion in der Sensorik und deren Anwendung auf die Metrologie sehr kleiner Objekte und Messgrößen sind Beispiele für die Kombination von Quanten- und Nanometrologie. Entsprechende Sensoren, wie das in QUANOMET entwickelte nanoLED Array, basieren auf neuen nanoskaligen Chipstrukturen in Kombination mit photonischen Systemen.

Zukunftsweisende Forschungsziele sind insbesondere speziell angepasste Quantensysteme zu entwickeln, wie zum Beispiel eine Anordnung von vielen einzelnen Ionen, die in Mikro- und Nanofallen gespeichert werden oder kohärente atomare Ensembles in sogenannte optischen Kristallen, die aus entsprechenden optischen Stehwellenfeldern geformt werden. Derartige Quantensysteme ermöglichen eine hohe Kurzzeitstabilität und Genauigkeit, welche die von klassischen Sensoren, die für die Absolutmessung zum Beispiel in Atomuhren oder bei Gravitationsmessungen eingesetzt werden, bereits deutlich übertreffen. Hier können zukünftig auch Quantenkorrelationen genutzt werden, um klassische Rausch-Limits zu unterschreiten. Die Kombina-

Abbildung 4
Das LED-Array-Mikroskop erlaubt Auflösungen unterhalb von 1 µm. Einzelne LEDs werden in einer Matrix sequentiell nacheinander betrieben. Dabei befindet sich die Probe direkt auf dem LED-Array, ein gegenüberliegender Photodetektor nimmt die transmittierte Intensität auf. Der genaue Ort der Messung ist durch die bekannte Position der aktiven LED bestimmt.



tion der Kompetenzen in Hannover (QUEST-LFS und HITEC mit dem VLBAI-Teststand), Braunschweig (in der neu entstehenden Forschungsinfrastruktur LENA innerhalb der Metrology Initiative Braunschweig), PTB (mit der Erforschung und Entwicklung von Atomuhren und der Präzisionsmesstechnik) oder Laserzentrum Hannover (mit der Präzisionslaserbearbeitung) stellen ein weltweites Alleinstellungsmerkmal hinsichtlich Präzisionsherstellungsverfahren, Analytik, Messtechnik und quantenphysikalischem Grundlagenverständnis dar.

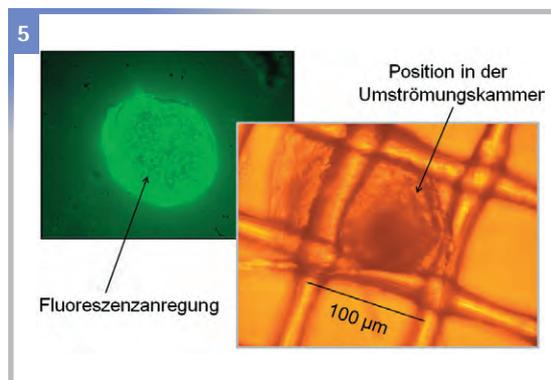
Ein zusätzlicher Anspruch ergibt sich aus der metrologischen Erfassung von Systemen aus den Lebenswissenschaften und der Medizin wie zum Beispiel lebende Zellen oder DNA. Derartige Objekte sind oft eingebettet in eine komplexe (oft biologische) Umgebung mit Prozessen, die teilweise in-

nerhalb von Femtosekunden (0,000 000 000 001 s) ablaufen. Ein exzellentes Beispiel stellen Proteine in Zellmembranen dar. Diese Moleküle vermitteln die Kommunikation von äußeren Signalgebern in die Zelle. Diese filigrane Gesamtregulation kann bisher noch nicht abgebildet werden. Die Kontrolle und Vermessung derartiger Strukturen würde einen großen Schritt für das Verständnis der zugrundeliegenden Vorgänge bedeuten.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich dadurch, dass nano- und quantenskalierte sowie biologische Komponenten und Systeme in Zukunft allgegenwärtig auf unsere technisierte Gesellschaft und natürliche Umwelt einwirken werden. Zur Einschätzung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ist die Entwicklung begleitender metrologischer Verfahren unabdingbar, momentan aber

nicht oder nicht ausreichend entwickelt. Sofern metrologische Verfahren überhaupt verfügbar sind, sind diese meist sehr komplex und nur eingeschränkt zugänglich. Ziel muss es auch sein, eine möglichst hohe Verfügbarkeit metrologischer Verfahren zur Charakterisierung von Quanten- und Nanosystemen zu garantieren. Dies ist heute aufgrund der hohen Komplexität der Messverfahren noch nicht gegeben.

Abbildung 5
nanoLED-Arrays mit Abmessungen im sub-mm-Bereich lassen sich zukünftig durch örtlich aufgelöste Fluoreszenzanregung für Untersuchungen von physiologischen Regulationsvorgängen der Pankreasinsel und deren Störungen bei der Entstehung des Typ-2-Diabetes einsetzen.



Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Jahrgang 1949, ist seit 1994 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Von 1997 bis 2009 war er Sprecher des SFB 407 »Quantenlimitierte Meßprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen«, von 2007 bis 2014 war er Sprecher des Exzellenz Clusters »Quantum Engineering and Space-Time Research« (QUEST). Er ist Sprecher von QUANOMET und Sprecher des HITEC-Vorstands.
Kontakt: ertmer@iqo.uni-hannover.de



Prof. Dr. Andreas Waag

Jahrgang 1961, ist seit 2003 Leiter des Instituts für Halbleitertechnik an der Technische Universität Braunschweig. Er ist Sprecher der Forschungsbauintiative »Laboratory of Emerging Nanometrology« (LENA), seit 2016 Leiter des »Epitaxy Competence Centres EC2« in Braunschweig sowie Co-Sprecher der Forschungslinie QUANOMET in der Wissenschaftsallianz Braunschweig-Hannover.
Kontakt: a.waag@tu-bs.de



Dr. Thorben Dammeyer

Jahrgang 1977, hat 2008 am Institut für Mikrobiologie der Technischen Universität Braunschweig in Proteinbiochemie promoviert. Seit 2015 ist er Geschäftsführer des Forschungszentrums »Laboratory for Emerging Nanometrology« (LENA) in Braunschweig und seit 2017 parallel Geschäftsführer der »Metrologie Initiative Braunschweig (MIB)«
Kontakt: t.dammeyer@tu-braunschweig.de



Dr. Alexander Wanner

Jahrgang 1978, hat 2013 am Institut für Gravitationsphysik in technischer Physik promoviert. Seit 2013 hat er als Geschäftsführer der QUEST Leibniz Forschungsschule die Planung und den Bau des HITEC begleitet. Seit der Gebäudeeröffnung im Juni 2018 ist er Geschäftsführer vom HITEC sowie Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 1227 DQ-mat.
Kontakt: alexander.wanner@quest.uni-hannover.de

Sonderforschungsbereich 1227 DQ-mat

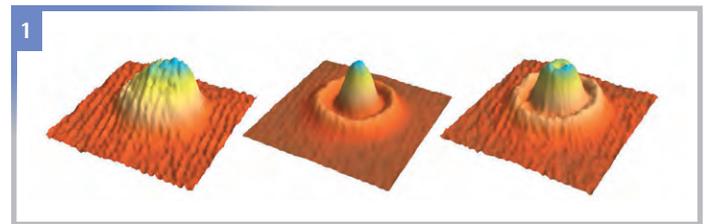
DESIGNTE QUANTENZUSTÄNDE UND DEREN ANWENDUNG IN DER GRUNDLAGENFORSCHUNG

Der Sonderforschungsbereich DQ-mat ist für das neu eröffnete HITec von besonderer Bedeutung, da dort nach Möglichkeiten geforscht wird, die Eigenschaften von Licht und Materie zu messen und zu kontrollieren und somit das Verständnis physikalischer Vorgänge zu erweitern. Zwei Sprecher und der Geschäftsführer von DQ-mat berichten über die Inhalte des Forschungsprojektes.

Das HITec bietet vielfältige Möglichkeiten der wissenschaftlichen Entfaltung – doch die Forschungsprojekte können nur durch Einwerbung von Drittmitteln realisiert werden. Ein solches Instrument der Drittmittelförderung sind Sonderforschungsbereiche (SFB) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Ein SFB ist eine langfristige, auf die Dauer von bis zu zwölf Jahren angelegte Forschungseinrichtung der Universität, in der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Rahmen eines fächerübergreifenden Forschungsprogramms zusammenarbeiten.

Für die Forschung im HITec ist der SFB 1227 DQ-mat von großer Bedeutung. DQ-mat steht für »Designte Quantenzustände der Materie – Herstellung, Manipulation und Detektion für metrologische Anwendungen und Tests fundamentaler Physik«. Der SFB besteht aus 15 Teilprojekten, die von einzelnen oder von mehreren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gemeinsam geleitet werden.

Die Vision von DQ-mat ist es, die Kontrolle über einzelne Atome und Moleküle zu verstehen, dieses Wissen auf Systeme mit vielen Quantenteilchen auszudehnen und schließlich mögliche Anwendung in der Metrologie zu erschließen. Isolierte Atome und Moleküle dienen schon lange als eines der am besten kont-



rollierbaren Systeme, um fundamentale Fragen der Physik zu studieren und zu beantworten. Die jüngsten Entwicklungen in der Metrologie, etwa optische Uhren mit einer Genauigkeit von 18 Stellen hinter dem Komma oder Materiewellen-Interferometrie, bei der die atomaren Wellenpakete um mehrere Dezimeter getrennt werden, demonstrieren eindrucksvoll die Kontrolle über Ein-Teilchen-Systeme. Die Ausdehnung auf große, wechselwirkende und verschränkte Quantensysteme soll es nun ermöglichen, die Genauigkeit und Auflösung von Quantensensoren signifikant zu verbessern. Neben praktischen Anwendungen kann durch hochgenaue Messungen mit optischen Uhren und Materiewellen-Interferometern der nächsten Generation voraussichtlich auch unser Verständnis der Naturgesetze überprüft werden. Dazu gehören zum Beispiel Fragen nach einer möglichen Änderung von Naturkonstanten, einer Verletzung fundamentaler Symmetrien in der Physik und dem Einfluss der Gravitation auf Quantensysteme.

Neben Expertinnen und Experten der Leibniz Universität Hannover aus den Forschungsschwerpunkten Vielteilchenphysik, Quanteninformation, Gravitation, Quantengase und Metrologie arbeiten auch beteiligte Institutionen wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen gemeinsam an der Entwicklung neuer Methoden zur Erzeugung und Manipulation von Quantenzuständen. Die Untersuchung dieser Zustände erlaubt ein tieferes Verständnis der Quanteneigenschaften von Vielteilchensystemen. Damit widmet sich DQ-mat einer der größten Herausforderungen der modernen Physik.

Die Forschung der 15 Forschungsgruppen des SFBs DQ-mat ist organisiert in zwei Forschungsfelder (Research Areas): Research Area A »Quanten-korrelierte Vielteilchensysteme« und Research Area B »Quantenmetrologie zum Test physikalischer Grundlagen«. Hinzu kommt

ein »Projekt Ö« zur Förderung der Öffentlichkeitsarbeit des SFBs und insbesondere der Vermittlung von moderner Quantenforschung in Schulen.

Research Area A – Quanten-korrelierte Vielteilchensysteme

Das Hauptziel von Research Area A ist die Entwicklung eines umfassenden Verständnisses und der Kontrolle von

tenkorrelationen in Systemen von etwa zehn bis zu zehntausenden von Partikeln. DQ-mat Forschende sollen ein Verständnis und letztlich die Fähigkeit entwickeln, die Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit Licht auszunutzen, um Quantenzustände von Materie zu detektieren und zu kontrollieren.

Neuartige Beschreibungs-methoden sollen eine effiziente

chanische Korrelationen die Systemdynamik dominieren, werden klassische Konzepte wie zum Beispiel die Thermodynamik scheinbar außer Kraft gesetzt. Der Übergang von hochverschränkten zu klassischen Systemen und die besonderen Eigenschaften und neue Anwendungen von Vielteilchensystemen stellen faszinierende Forschungsfragen dar. Solche Anwendungen im Bereich der Quantenmetrologie werden in Research Area B für Tests fundamentaler Physik eingesetzt.

Research Area B – Quantenmetrologie zum Test physikalischer Grundlagen

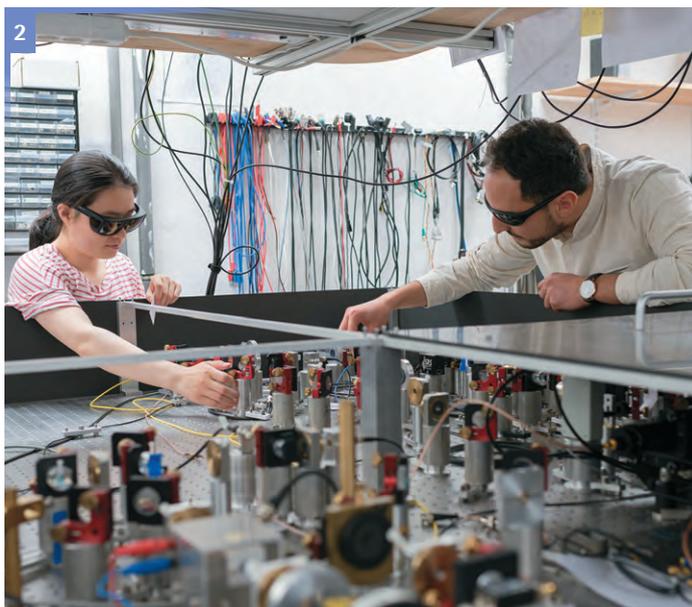
Das Hauptziel von Research Area B ist die Gestaltung von quantenkorrelierten Einzel- und Vielteilchenzuständen, um die Leistungsfähigkeit moderner Quantensensoren wie Uhren und Materiewellen-Interferometer zu verbessern und deren verbesserte Auflösung und Empfindlichkeit auszunutzen, um die Physik der Grundbausteine der Materie zu erforschen. In HITec werden DQ-mat Forschende beispielsweise Materie-Wellen-Interferometrie untersuchen. Mit dem Größtgerät VLBAI »Very Long Baseline Atom Interferometer« werden wir zum ersten Mal Wellenpakete über Abstände von Metern trennen und für mehrere Sekunden untersucht können. Die neu gewonnenen Erkenntnisse finden Anwendung in der Inertial-Sensorik und in Atomuhren.

In DQ-mat entwickeln und bauen wir optische Uhren, die einer Ungenauigkeit von besser als 10^{-18} entsprechen – mit anderen Worten: die Uhr wird erst nach etwa 30 Milliarden Jahren (dem doppelten Alter des Universums) um ungefähr eine Sekunde nach- oder vorgehen. Die optischen Uhren

Abbildung 1
Bei extrem kalten Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt lassen sich Atome als Materiewellen beschreiben. Zu sehen ist die Dichteverteilung eines Rubidium-Gases in einem sogenannten Bose-Einstein-Kondensat, deren wellenförmige Ausbreitung an Schwingungsmoden einer Trommel erinnern.
(Quelle: IQO/Klempt)

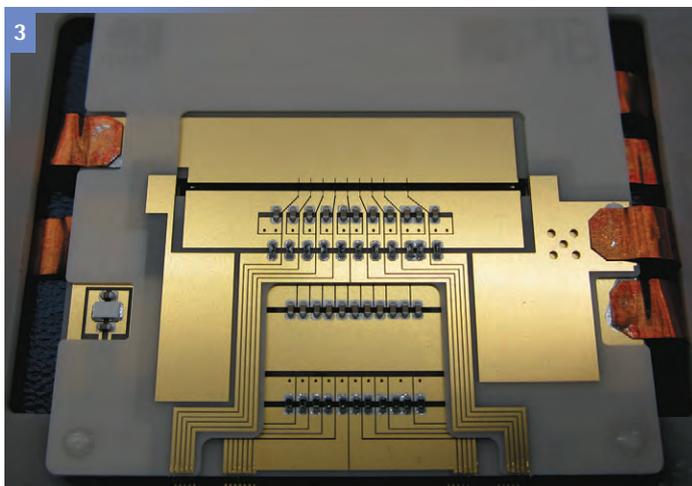
Abbildung 2
Studierende führen Arbeiten am Optik-Experiment durch.
(Quelle: QUEST-LFS/D. Vogl)

Abbildung 3
Eine neuartige Ionenfalle. Dünne Abstandshalter zwischen den Elektrodenschichten ermöglichen einen 3D-Laserzugriff.
(Quelle: Chr. Ospelkaus)



Einzel- und Vielteilchensystemen. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung neuer Ansätze und Konzepte zur Manipulation, Erkennung und Charakterisierung von Quan-

Computersimulation ermöglichen und darüber ein tieferes Verständnis für die Eigenschaften von Verschränkung in Quantensystemen erlangt werden. Sobald quantenme-



mit derartig hoher Genauigkeit dienen zum einen der exakten Zeitmessung von kurzlebigen Abläufen in der Forschung, zum anderen der genauen Zeitbestimmung (ein Milliardstel einer Milliardstel Sekunde) und der Koordinierung verschiedener Zeitsysteme und -skalen. Ferner werden robuste optische Uhren in Zukunft auch in der Telekommunikation, in der Energieversorgung, zum Kalibrieren in der Industrie und zur Navigation mit deutlich verbesserter Präzision eingesetzt.

Kombiniert man verschränkte Uhren beispielsweise mit Materiewellen-Interferometern in einem Gravitationspotenzial, könnte man untersuchen, ob es kleinste Abweichungen von den erwarteten Signalen gibt. Dies würde auf neue Effekte der Wechselwirkung von

stark delokalisierten Quantensystemen mit der Gravitation hindeuten und damit möglicherweise Licht in eines der großen ungelösten Rätsel der Physik bringen: Wie vereint man Einsteins Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik?

Durch die Erweiterung der Quantenkontrolle auf exotischere Systeme wie (Anti-) Protonen, Kerne und Moleküle, können wir hochgenaue Frequenzvergleiche zwischen neuartigen Systemen durchführen. Eine genaue Untersuchung solcher Systeme ermöglicht es uns, die gegenwärtigen Grenzen fundamentaler physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu untersuchen und damit die Grenzen der Vorhersagekraft grundlegender Quantenfeldtheorien auszuloten.

Die Anwendung neuester Erkenntnisse in der experimentellen Forschung wird es uns erlauben, möglichen Variation von fundamentalen physikalischen Konstanten nachzuweisen. Ein Beispiel dafür ist die Feinstrukturkonstante α , eine Kopplungskonstante die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung beschreibt, also wie stark ein Elektron vom positiv geladenen Atomkern angezogen wird. Eine mögliche Änderung der Feinstrukturkonstante α könnte über die Koppelung an sogenannte dunkle Materie verursacht werden. Dunkle Materie ist ein Erklärungsversuch für astronomische Anomalien, die durch zusätzliche, für uns nicht sichtbare Masse im Universum verursacht sein könnten. Messungen in *DQ-mat* können daher bestimmte Modelle für dunkle Materie ein-, beziehungsweise ausschließen.

Projekt Ö: foeXlab - Ein außerschulischer Lernort

Das »Projekt Ö« ist ein wissenschaftskommunikatives Projekt des *DQ-mat* an der Leibniz Universität Hannover. Das Projekt soll den MINT-Fächern (Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften, Technik) ein besseres Image und dadurch mehr Popularität verschaffen sowie in einschlägigen Studiengängen die Anzahl talentierter Studierender erhöhen. »In diesem Projekt des Sonderforschungsbereichs streben wir ein Bildungskonzept an, das sich außerschulisch an Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II sowie an ihre Lehrkräfte wendet und schließlich auch an Lehramtsstudierende der Leibniz Univer-

sität im Rahmen des foeXlab als Lehr-Lernlabor«, berichtet Junior-Professorin Dr. Susanne Weßnigk, fachdidaktische Leiterin des Projekts Ö. Das Projekt Ö organisiert die bildungsorientierte Öffentlichkeitsarbeit von *DQ-mat*, hierzu gehören öffentliche Vorträge in den Schulen, sowie Trainings- und Praktikumsprogramme in den Räumlichkeiten des foeXlab. Das foeXlab ist ein Schülerlabor, das mit Arbeitsstationen zu den Grundlagen der Optik, statistischen Optik und fortschrittlicher Laser-Interferometrie eingerichtet ist. »Das foeXlab ist sehr beliebt bei teilnehmenden Schülergruppen und deren Lehrerinnen und Lehrern«, freut sich Projektkoordinator Dr. Rüdiger Scholz, »und soll durch weitere Experimente erweitert werden«.

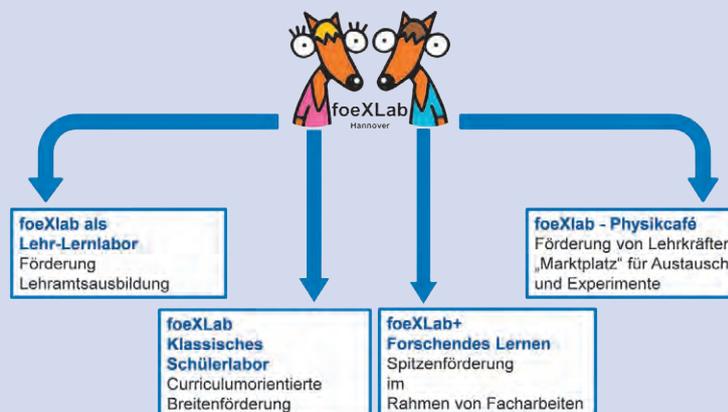




Abbildung
Das DQ-mat Team
im Lichthof der
Leibniz Universität
Hannover.
(Quelle: DQ-mat/Wanner)



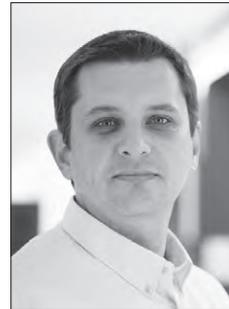
Prof. Dr. Piet O. Schmidt

Jahrgang 1970, ist seit 2009 Professor für Experimentalphysik an der Leibniz Universität Hannover und Leiter des QUEST-Instituts für Experimentelle Quantenmetrologie an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Seit 2016 ist er Sprecher des SFB 1227 DQ-mat. Zudem ist er Mitglied im HITec-Vorstand und Mitglied im Wissenschaftlichen Rat von QUANOMET.
Kontakt: Piet.Schmidt@quantummetrology.de



Prof. Dr. Klemens Hammerer

Jahrgang 1975, ist seit 2010 Professor für Theoretische Physik an der Leibniz Universität Hannover und Leiter der Forschergruppe Macroscopic Quantum Objects im Exzellenzcluster QUEST. Seit 2016 ist er Co-Sprecher des SFB 1227 DQ-mat.
Kontakt: klemens.hammerer@itp.uni-hannover.de



Dr. Alexander Wanner

Jahrgang 1978, hat 2013 am Institut für Gravitationsphysik in technischer Physik promoviert. Seit 2013 hat er als Geschäftsführer der QUEST Leibniz Forschungsschule die Planung und den Bau des HITec begleitet. Seit der Gebäudeeröffnung ist er Geschäftsführer vom HITec sowie des Sonderforschungsbereichs 1227 DQ-mat.
Kontakt: alexander.wanner@quest.uni-hannover.de

Personalia und Preise

BERUFUNGEN

Rufe an die Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. **Olivier Brand**, Universität Mannheim, hat den Ruf auf die W3-Professur für Bürgerliches Recht und Versicherungsrecht abgelehnt.

Prof. Dr. **Christoph Brömmelmeyer**, Europa Universität Viadrina Frankfurt (Oder), hat den Ruf auf die W3-Professur für Bürgerliches Recht und Versicherungsrecht abgelehnt.

Ass.-Prof. Dr. **Nico Bruns**, Universität Freiburg, hat den Ruf auf die W2-Professur für Polymerchemie abgelehnt.

Dr. **Tuba Esatbeyoglu**, Max Rubner-Institut in Karlsruhe, hat den Ruf auf die W2-Professur für Lebensmittelentwicklung und Lebensmittelqualität erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Sascha Fahl**, Universität Bochum, hat den Ruf auf die W2-Professur mit Tenure Track zu W3 für IT-Sicherheit angenommen.

Dr. **Denis Gebauer**, Universität Konstanz, hat den Ruf auf die W2-Professur für Festkörperanalytik erhalten.

Dr.-Ing. **Michael Haist**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), hat den Ruf auf die W3-Professur für Baustoffe erhalten.

Jun.-Prof. Dr. **Annika Herr**, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, hat den Ruf auf die W3-Professur für Gesundheitsökonomie angenommen.

Prof. Dr. **Christian Imdorf**, NTNU Trondheim, hat den Ruf auf die W3-Professur für Bildungssoziologie angenommen.

Prof. Dr. **Kerstin Kremer**, Universität Kiel, hat den Ruf auf die W3-Professur für Didaktik der Biologie angenommen.

Dr. **Alexander Kühne**, Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen, hat den Ruf auf die W2-Professur für Polymerchemie abgelehnt.

Dr.-Ing. **Matthias Müller**, Universität Stuttgart, hat den Ruf auf die W3-Professur für Regelungstechnik angenommen.

Jun.-Prof. Dr. **Claudia Müller-Brauers**, Ruhr-Universität Bochum, hat den Ruf auf die W3-Professur für Didaktik der Symbolsysteme angenommen.

Prof. Dr. **Thomas Pfannschmidt**, Universität Grenoble (Grenoble, France), hat den Ruf auf die W3-Professur für Pflanzenphysiologie angenommen.

PD Dr. **Felix Plamper**, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, hat den Ruf auf die W2-Professur für Polymerchemie abgelehnt.

Dipl.-Ing. **Tim Rieniets**, Landesinitiative StadtBauKultur NRW, hat den Ruf auf die W2-Professur für Stadt- und Raumentwicklung in einer diversifizierten Gesellschaft erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Matthias Scherer**, Technische Universität München, hat den Ruf auf die W3-Professur für Versicherungsmathematik abgelehnt.

Ass.-Prof. Dr. **Dominik Schillinger**, University of Minnesota, hat den Ruf auf die W2-Professur mit Tenure Track zu W3 für Höchstleistungsrechnen in der Mechanik erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Marcus Schütte**, TU Dresden, hat den Ruf auf die W3-Professur für Didaktik der Symbolsysteme – Schwerpunkt Mathematik erhalten.

Prof. Dr. **Philipp Theison**, Universität Zürich, hat den Ruf auf die W3-Professur für Deutsche Literatur mit dem Schwerpunkt Kultur- und Wissensgeschichte erhalten und abgelehnt.

Prof. Dr. **Marc Thielen**, Universität Bremen, hat den Ruf auf die W3-Professur für Berufsorientierung in inklusiven Kontexten angenommen.

Dr. **Andreas Wachter**, Universität Tübingen, hat den Ruf auf die W3-Professur für Pflanzenphysiologie abgelehnt.

Bitte lesen Sie weiter auf Seite 58



Motiviert und neugierig?

Wir suchen Sie! Wachsen Sie mit uns über sich hinaus!

Seit der Etablierung im deutschen Gastransportmarkt baut Gasunie ihre starke Position als zentraler Pfeiler der nordwesteuropäischen Gasdrehscheibe zukunftsorientiert weiter aus.

- ▶ Sie haben Ihr wirtschaftswissenschaftliches, technisches oder naturwissenschaftliches Hochschulstudium erfolgreich abgeschlossen und möchten jetzt mit viel Einsatzwillen den Grundstein für Ihren beruflichen Erfolg in der Energiebranche legen?
- ▶ Wir bieten Ihnen ein anspruchsvolles Aufgabengebiet mit hoher Eigenverantwortung in einem engagierten Team, eingebettet in ein attraktives Vergütungssystem mit umfangreichen betrieblichen Sozialleistungen.

Bleiben Sie neugierig! Besuchen Sie unsere Karriereseite unter www.gasunie.de und bewerben sich bei uns! Haben Sie Fragen? Dann nehmen Sie Kontakt auf: Esther.Wigger-Martens@gasunie.de

GREAT PLACE TO WORK®

2018

Beste Arbeitgeber*
Niedersachsen
Bremen

WWW.STARTING-BUSINESS.DE

TRÄUMEN ODER
MACHEN?

JETZT EIGENES **STARTUP** GRÜNDEN
UND FÖRDERUNG SICHERN!

Dr. Marie Weinhart, Freie Universität Berlin, hat den Ruf auf die W2-Professur für Polymerchemie erhalten.

Prof. Dr. **Volker Wiese**, Universität Bayreuth, hat den Ruf auf die W3-Professur für Bürgerliches Recht, Internationales Privatrecht und Rechtsvergleichung angenommen.

PD Dr. **Antonia Zapf**, Georg-August-Universität Göttingen, hat den Ruf auf die W2-Professur für Biostatistik abgelehnt.

Prof. Dr. **Meik Zülsdorf-Kersting**, Universität Osnabrück, hat den Ruf auf die W2-Professur für Didaktik der Geschichte angenommen.

Rufe nach außerhalb

Prof. Dr. **Susanne Beck**, Juristische Fakultät, hat den Ruf auf die W3-Professur für Strafrecht und Strafprozessrecht im Fachbereich Rechtswissenschaft der Universität Frankfurt a.M. erhalten und abgelehnt.

Prof. Dr. **Jessica Burgner-Kahrs**, Fakultät für Maschinenbau, hat den Ruf auf eine Professur im Fachbereich Mathematical and Computational Sciences der University of Toronto angenommen.

Ernennung zur Juniorprofessorin / zum Juniorprofessor

Dr. **Kerstin Nolte**, Naturwissenschaftliche Fakultät, wurde mit Wirkung zum 1. September 2018 zur Juniorprofessorin ernannt.

Dr. **Philipp Otto**, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, wurde mit Wirkung zum 1. September 2018 zum Juniorprofessor ernannt.

Ernennung zur Universitätsprofessorin / zum Universitätsprofessor

Prof. Dr. **Cornelia Lee-Thedieck**, Naturwissenschaftliche Fakultät, wurde mit Wirkung zum 15. Oktober 2018 zur Universitätsprofessorin der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. **Astrid Nieße**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, wurde mit Wirkung zum 1. Januar 2018 zur Universitätsprofessorin der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dipl.-Ing. **Tim Gabriel Rieniets**, Fakultät für Architektur und Landschaft, wurde mit Wirkung zum 1. September 2018 zum Universitätsprofessor der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Bestellung zur Honorarprofessorin / zum Honorarprofessor

Hon.-Prof. Dr.-Ing. **Frank Merschel**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, wurde mit Wirkung zum 2. Mai 2018 zum Honorarprofessor der Leibniz Universität Hannover bestellt.

Prof. Dr.-Ing. **Matthias Narroschke**, Hochschule RheinMain, wurde mit Wirkung zum 20. März 2018 zum Honorarprofessor der Leibniz Universität Hannover bestellt.

Dr. **Alexander Schwonberg**, Juristische Fakultät, wurde mit Wirkung zum 30. Juli 2018 zum Honorarprofessor der Leibniz Universität Hannover bestellt.



**Deutsch für das Studium
Abendkurse Deutsch
Deutsch für Mediziner**

ISK | Lützowstraße 7 | 30159 Hannover
05 11. 12 35 63 60 | www.isk-hannover.de

ISK

**Institut für Sprachen
und Kommunikation**



Kluge Köpfe

für Ihr Unternehmen!

Ihr Kontakt
Matthias Nee
+49 511 762 - 17285
nee@zqs.uni-hannover.de
Sprechen Sie mich bei
Interesse gerne an!

Zentrales Stellenportal
der Leibniz Universität Hannover
stellenticket.uni-hannover.de



RUHESTAND

Prof. Dr. **Rudolf Grübel**, Fakultät für Mathematik und Physik, trat mit Ablauf des Monats September 2018 in den Ruhestand.

Prof. Dr.-Ing. **Wolfgang Mathis**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, trat mit Ablauf des Monats September 2018 in den Ruhestand.

BEENDIGUNG DES BEAMTENVERHÄLTNISSSES MIT DEM LAND NIEDERSACHSEN KRAFT GESETZES

Prof. Dr. **Ghislain Fourier**, Fakultät für Mathematik und Physik, wurde mit Ablauf des 23. Juli 2018 aus dem Beamtenverhältnis mit dem Land Niedersachsen entlassen.

Prof. Dr.-Ing. **Sami Haddadin**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, wurde mit Ablauf des 31. März 2018 aus dem Beamtenverhältnis mit dem Land Niedersachsen entlassen.

Prof. Dr. **Emil Wiedemann**, Fakultät für Mathematik und Physik, wurde mit Ablauf des 31. August 2018 aus dem Beamtenverhältnis mit dem Land Niedersachsen entlassen.

VERSTORBEN

Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. **Gernot Funk**, ehemals Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, verstarb am 8. März 2018 im Alter von 93 Jahren.

Prof. Dipl.-Pol. Dr. rer. pol. **Dietrich Haensch**, ehemals Philosophische Fakultät, verstarb am 14. August 2018 im Alter von 81 Jahren.

Prof. Dr. **Siegfried Jenkner**, ehemals Philosophische Fakultät, verstarb am 20. Juni 2018 im Alter von 87 Jahren.

Prof. Dr.-Ing. **Jürgen Roth**, ehemals Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, verstarb am 9. August 2018 im Alter von 81 Jahren.

Regierungsdirektor a. D. **Hans-Georg Wischwill**, ehemals Leiter des Dezernats Personal und Zentrale Dienste, verstarb am 1. September 2018 im Alter von 69 Jahren.

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. **Karl Wilhelm Schügerl**, ehemals Naturwissenschaftliche Fakultät, verstarb am 20. Oktober 2018 im Alter von 91 Jahren.

PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

Dr. **Sifeng Bi** vom France-Comte Electronique Mecanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies, Besancon, Frankreich, hat ein Humboldt-Forschungsstipendium erhalten. Gastgeber ist Prof. Dr.-Ing. Michael Beer, Institut Risiko und Zuverlässigkeit, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie.

Beim Studierendenwettbewerb der Gesellschaft für Informatik e.V. haben zwei Teams der Leibniz Universität Hannover den zweiten beziehungsweise den vierten Platz belegt. Der zweite Preis ging an das Team CarEFul:

Wolfgang Gritz, Nils Nommensen, Jonas Wallat und Josef Kriegel erhielten ein Preisgeld in Höhe von 2.000 Euro. **Axel Claasen, Sebastian Drath und Burak Kadioglu** haben den mit 500 Euro dotierten GI-Preis erhalten.

Die **Pictum MT GmbH**, eine Ausgründung aus der Leibniz Universität Hannover, ist auf der Hannover Messe mit dem »Gründerpreis Digitale Innovationen« ausgezeichnet worden. Der mit 32.000 Euro dotierte Preis ging erstmalig nach Hannover.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zeichnet die beiden Nachwuchswissenschaftler Dr. **Xiaoying Zhuang** und Dr. **Sascha Fahl** mit Heinz-Maier-Leibnitz-Preisen aus. Deutschlandweit werden jährlich zehn der Auszeichnungen, die mit 20.000 Euro dotiert sind, vergeben. Gleich zwei dieser Preise gehen in diesem Jahr an die Leibniz Universität Hannover. Die Mittel stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung bereit. Die Preise wurden am 29. Mai 2018 in Berlin verliehen.

Bitte lesen Sie weiter auf Seite 62

SEI TEIL VON ETWAS

Besuchen Sie uns auf der Messe:
Lichthof im Hauptgebäude



MACH MAL KARRIERE ...

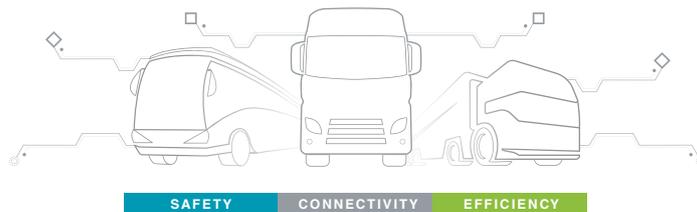
...IN EINEM RICHTIG GUTEN TEAM.

Karrieren wachsen in Unternehmen, die in das Know-how ihrer Mitarbeiter investieren. Als Unternehmen für hochwertige Engineering-Services erkennen wir die Potenziale unseres Teams – und fördern sie. Mit unserem Karriereprogramm treiben wir deine Zukunft mit anspruchsvollen Projekten bei namhaften Kunden voran.

Neugierig? Dann schalte in den Karriereturbo unter www.salt-and-pepper.eu und werde Teil unseres Teams.

SALTANDPEPPER

www.wabco-auto.com



WABCO
Mobilizing Vehicle Intelligence

**Verbessere die Sicherheit auf unseren Straßen und hilf uns die Umwelt zu schützen!
Werde Teil der WABCO Familie!**

Wir bieten spannende Praktika, Jobs und Entwicklungsmöglichkeiten für Ingenieure mit Schwerpunkt
► Maschinenbau ► Fahrzeugtechnik ► Mechatronik ► Elektrotechnik ► Informatik

Triff uns persönlich auf den Career Dates 2019

Mittwoch, 22. Mai 2019 | 10–16 Uhr | Lichthof der Leibniz Universität Hannover | Hauptgebäude | Welfengarten 1 | 30167 Hannover



**WIR SUCHEN TALENTE
FÜR DIE ENERGIEWELT VON MORGEN!**

Lerne uns auf der **Career Dates 2019** kennen und finde deinen passenden Einstieg als Praktikant, Werkstudent oder Trainee bei Avacon.

www.avacon.de/karriere

avacon

Dr. **Xiaoying Zhuang** wurde für ihre Arbeit bereits mit zahlreichen Preisen ausgezeichnet: Sie hat allein im Jahr 2018 den mit 10.000 Euro dotierten Niedersächsischen Wissenschaftspreis in der Kategorie »Nachwuchswissenschaftlerin« sowie den Heinz Maier-Leibnitz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (siehe oben) erhalten und ist darüber hinaus mit dem ERC-Starting Grant ausgezeichnet worden, mit dem der Europäische Wissenschaftsrat exzellente und visionäre Forschungen von herausragenden Nachwuchswissenschaftlerinnen und –wissenschaftlern mit bis zu 1,5 Millionen Euro fördert.

Mit dem Hauptpreis des diesjährigen Gauss-Preises der Deutschen Gesellschaft für Versicherungs- und Finanzmarketing sind Prof. Dr. **Stefan Weber** und M. Sc. **Kerstin Weske**, Institut für Mathematische Stochastik an der Fakultät für Mathematik und Physik, ausgezeichnet worden. Der Preis ist mit 10.000 Euro dotiert. Außerdem hat das Institut zwei Best Paper Awards beim International Congress of Actuaries erhalten.

Für ihre herausragenden Leistungen bei Bachelor und Masterabschlüssen sowie Promotionen wurden Absolventinnen und Absolventen der **Fakultät für Maschinenbau** mit den Dr.-Jürgen-Ulderup-Preisen ausgezeichnet. Insgesamt 14 Absolventinnen und Absolventen erhielten Preise in der Gesamthöhe von 33.000 Euro. Die nach dem Unterneh-

mer und Maschinenbauingenieur Dr.-Ing. Jürgen Ulderup (1910 bis 1991) und seiner Frau Irmgard Ulderup (1922 bis 2011) benannte Stiftung wurde 1983 gegründet. Ziel der Stiftung ist unter anderem die Förderung begabter Studierender des Maschinenbaus.

Den Preis der Stiftung Prof. Dr. Joachim Lenz hat Prof. Dr. **Georg Steinhäuser**, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, erhalten. Mit dem Preisgeld in Höhe von 10.000 Euro sollen zwei Masterarbeiten zur Untersuchung der Strahlenbelastung der aquatischen Umwelt in Tschernobyl gefördert werden.

Prof. Dr. **Michael Breitner**, M.Sc. **Max Leyerer** und M.Sc. **Marc-Oliver Sonneberg**, Institut für Wirtschaftsinformatik, sind während der Americas Conference on Information Systems (AMCIS) für ihren Artikel »Decision Support for Urban E-Grocery Operations« mit einem Best Paper Award ausgezeichnet worden.

M.Sc. **Beatrice Nöldeke**, Institut für Umweltökonomik und Welthandel, hat den Hans Hartwig Ruthenberg-Graduierten-Förderpreis erhalten. Der Preis ist mit 2.500 Euro dotiert.

Mit dem Camillo-Schneider-Preis der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft sind Dr. **Linnea Hesse**, Plant Biomechanics Group und Botanischer Garten Freiburg sowie M.Sc. **Philipp Ludwig**, Institut für Landschaftsarchitektur, ausgezeichnet worden.

Ein Humboldt-Forschungsstipendium für erfahrene Wissenschaftler hat Dr. **Francesco Vetere** (Universita degli Studi die Perugia) erhalten. Er wird für 18 Monate am Institut für Mineralogie forschen. Sein Gastgeber ist Prof. Dr. Francois Holtz.

Die Victor Rizkallah-Stiftung und die Stiftung NiedersachsenMetall haben am 12. Oktober 2018 neun Absolventinnen und Absolventen der Leibniz Universität Hannover mit Förderpreisen ausgezeichnet. Aus der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie wurden M. Sc. **Jannik Meyer** (Ludwig Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen), M. Sc. **Torben Jobst Helmut Peters** (Institut für Kartographie und Geoinformatik) und M. Sc. **Tim Scheiden** (Institut für Baustoffe) ausgezeichnet. Einen Sonderpreis der Victor Rizkallah-Stiftung erhielt Dr.-Ing. **Anne Fangmann** (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft). Mit den Auszeichnungen würdigen die Stiftungen hervorragende Abschlussarbeiten, die an der Leibniz Universität entstanden sind. Die Förderpreise der Stiftung NiedersachsenMetall gingen an Dr.-Ing. **Onur Misir** und M. Sc. **Reinhard Marwin Grassmann**.

Bitte lesen Sie weiter auf Seite 64

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

LeibnizSHOP

Der Shop der
Leibniz Universität Hannover
Welfenschloss
Welfengarten 1
30167 Hannover

Öffnungszeiten
Montag bis Freitag
10.00 - 14.00 Uhr



www.leibnizshop-uni.de



GASTWISSENSCHAFTLERINNEN UND GASTWISSENSCHAFTLER

Prof. Dr. **Catherine Kendig**, Michigan State University, war vom 11. Mai bis zum 27. Juli 2018 Gastwissenschaftlerin an der Philosophischen Fakultät.

Dr. **Susanne Schnell**, Universität Paderborn, ist seit dem 1. Oktober 2018 bis zum 31. März 2019 Gastwissenschaftlerin an der Fakultät für Mathematik und Physik.

SONSTIGES

Prof. Dr. **Henning Radtke** ist im Juli 2018 zum Richter des Bundesverfassungsgerichts in Karlsruhe. Der Strafrechtler war von 2005 bis 2012 Professor und anschließend Honorarprofessor an der Juristischen Fakultät der Leibniz Universität.

IN GREMIEN BERUFEN

Prof. Dr. **Rainer Danielzyk**, Institut für Umweltplanung und Generalsekretär der Akademie für Raumforschung und Landesplanung – Leibniz Forum für Raumwissenschaften, ist zum Vorsitzenden des Beirats für Raumentwicklung beim Bundesministerium für Inneres, Bau und Heimat gewählt worden. Der aus etwa 30 nationalen und internationalen Fachleuten der Raumwissenschaften und Raumplanungspraxis bestehende Beirat berät das zuständige Bundesministerium in allen grundsätzlichen und aktuellen Fragen der Raumentwicklung.

Der Präsident der Leibniz Universität Hannover, Prof. **Volker Epping**, ist erneut zum stellvertretenden Sprecher der Mitgliedergruppe Universitäten der Hochschulrektorenkonferenz gewählt worden. Als Sprecher wurde Prof. Dr. Ulrich Radtke, Universität Duisburg Essen, im Amt bestätigt.

Prof. Dr. **François Holtz**, Institut für Mineralogie, Naturwissenschaftliche Fakultät, ist in Anerkennung seiner internationalen Reputation und seines anhaltenden Beitrags zur europäischen Forschung zum Mitglied der Academia Europaea gewählt worden.

Prof. Dr. **Katharina Klemt-Albert**, Institut für Baumanagement und Digitales Bauen, ist in den Baubeirat berufen worden, den das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur eingerichtet hat, um die Bauvorhaben an der MHH und der Universitätsmedizin Göttingen baufachlich zu begleiten.

Dr. **Inger Lison**, Deutsches Seminar, ist in den Vorstand des Arbeitskreises für Jugendliteratur e.V. berufen worden.

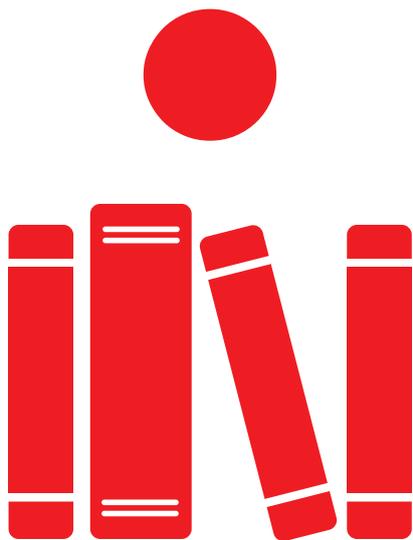
Prof. Dr. **Detlev Ristau**, Institut für Quantenoptik, ist in das wissenschaftliche Direktorium des Laser Zentrums Hannover e.V. berufen worden.

Das Fachsprachenzentrum unter der Leitung von Dr. **Klaus Schwienhorst** wurde in die Ständige Kommission des Arbeitskreises der Sprachenzentren an Hochschulen e.V. (AKS) gewählt. Der AKS ist der Dachverband der deutschen und einiger internationaler Sprachzentren an Hochschulen.

Prof. Dr.-Ing. **Peter Wriggers**, Institut für Kontinuumsmechanik an der Fakultät für Maschinenbau und Vizepräsident für Forschung an der Leibniz Universität Hannover, ist zum Corresponding Member of the Croatian Academy of Sciences and Arts in Zagreb gewählt worden.



Studieren ist einfach.



Wenn man eine Finanzpartnerin hat, die sich ums Geld kümmert.

Mit uns liegen Sie richtig – vor, während oder nach dem Studium. Sprechen Sie uns an! Zum fairen KfW-Studienkredit genauso wie zu allen anderen Fragen rund um Ihre Finanzen. Infos und Beratung auch online oder im Chat.

sparkasse-hannover.de/studenten



Wenn's um Geld geht

**Sparkasse
Hannover**

[berufsfinder]

Machen Sie uns zur
Plattform für Ihre IT-Karriere.

www.f-i.de/karriere

Jetzt bewerben! Wir suchen:

[zukunftsdefiniierer]

[zielfixierer]

[zertifizierer]

[lösungsfinder]

[profiakteure]

Treffen Sie uns auf den
Career Dates 2019