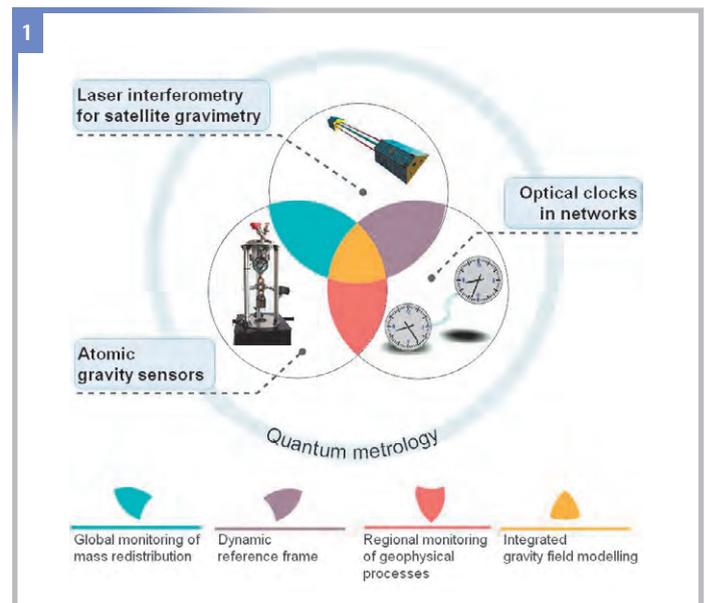


# Die Vermessung der Erde

## NEUE METHODEN ZUR BEOBACHTUNG VON MASSENVARIATIONEN

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.*



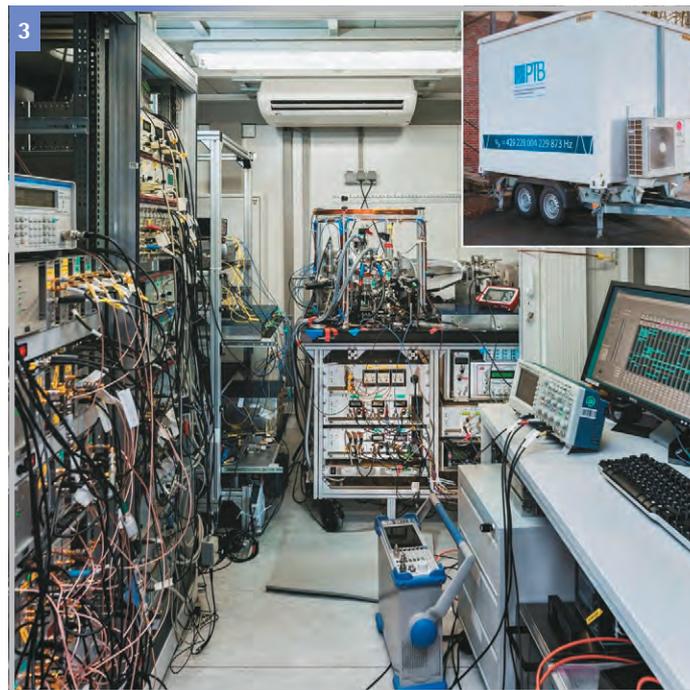
### Quantengravimetrie

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)

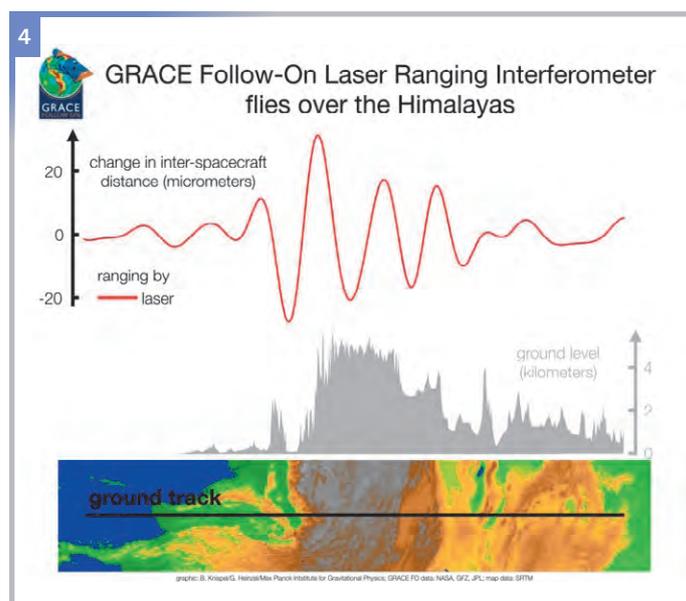


Für eine Messkampagne, die von Experten aus England, Italien und Deutschland durchgeführt wurde, ist die Strontiumuhr ins Modane Underground Laboratory im Fréjus-Tunnel zwischen Frankreich und Italien gefahren worden. Dort maß das Team die Differenz der Gravitationspotenziale zwischen dem Standort der 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  $\mu\text{m}$  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- $\mu\text{m}$ -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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:danzmann@aei.mpg.de)