

Neue Messmethoden für die gravimetrische Erdbeobachtung

New Measurement Methods for Gravimetric Earth Observation

Jürgen Müller | Manuel Schilling

Zusammenfassung

Klimarelevante Prozesse spiegeln sich vielfach in Schwerefeld-daten wider. Jedoch ist eine bessere raumzeitliche Auflösung und höhere Genauigkeit erforderlich, um die zugrunde liegenden Massenänderungen hinreichend zu erfassen. Dies kann nur durch die Nutzung neuer Methoden und insbesondere mit Hilfe innovativer quantentechnologischer Konzepte erreicht werden. Die Bündelung der Expertise aus der Geodäsie und der Physik bietet eine einzigartige Möglichkeit, um grundlegend neue Sensoren, Messtechniken und Analysemethoden zu entwickeln. Optische Abstandsmessung zwischen Satelliten, atominterferometrische Beschleunigungsmessung sowie chronometrisches Nivellement sind essenzielle Elemente. Mit diesen neuartigen Techniken können Massenvariationen auf fast allen raumzeitlichen Skalen mit bisher unerreichter Genauigkeit für eine Vielzahl von geowissenschaftlichen Anwendungen beobachtet werden, von der Überwachung lokaler Grundwasserspeicher bis hin zum Eismassenverlust in Grönland. Auch die Realisierung der geodätischen Höhensysteme profitiert von diesen Entwicklungen. Im vorliegenden Beitrag erläutern wir einige dieser innovativen Ansätze zur gravimetrischen Erdbeobachtung, mit gewissem Fokus auf den Standort Hannover.

Schlüsselwörter: Neue Konzepte zur Erdbeobachtung, relativistische Geodäsie, Quantengravimetrie

Summary

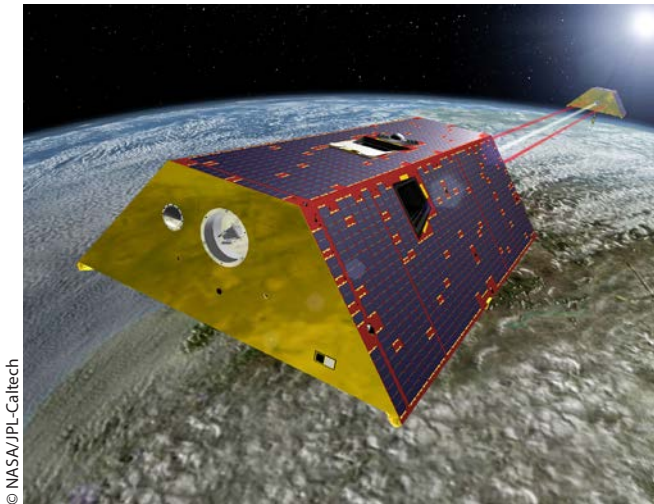
Climate-relevant processes are often reflected in gravity field data. However, a better spatial-temporal resolution and higher accuracy is required to adequately capture the underlying mass changes. This can only be achieved by using new methods, in particular, with the help of innovative quantum technological concepts. Combining the expertise from geodesy and physics offers a unique opportunity to develop fundamentally new sensors, measurement techniques and analysis methods. Optical distance measurement between satellites, acceleration measurement by atom interferometry and chronometric levelling are essential elements. With these novel techniques, mass variations at almost all spatial-temporal scales can be observed with unprecedented accuracy for a variety of geoscientific applications, from monitoring local groundwater reservoirs to ice mass loss in Greenland. The realisation of geodetic height systems also benefits from these developments. In this paper, we present some of these innovative approaches to gravimetric Earth observation, with some focus on the location Hannover.

Keywords: New concepts for Earth observation, relativistic geodesy, quantum gravimetry

1 Einführung

Für die globale Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variationen des Schwerefeldes wurden seit 2000 spezielle Satellitenmissionen realisiert; siehe auch Torge und Müller (2012) sowie Pail et al. (2015) und dort angegebene Referenzen. Die ESA-Mission GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) lieferte zwischen 2009 und 2013 Daten, die es erlaubten, das Geoid mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 cm für räumliche Strukturen von 100 km auf der Erdoberfläche zu berechnen (Brockmann et al. 2021). Als primäres Messkonzept wurde die Gradiometrie realisiert; hier werden differenzielle Gravitationsbeschleunigungen im Satelliten mit höchster Präzision beobachtet (Rummel et al. 2011). GOCE liefert damit die Grundlage zur Errichtung globaler, physikalisch definierter Höhensysteme sowie – zusammen mit der altimetrischen Bestimmung des Meeresspiegels – zur genauen Ableitung von Meeresströmungen. Die Mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), geleitet von NASA und DLR, hat von 2002 bis 2017 Messdaten geliefert. Messmethode ist das Satellite-to-Satellite-Tracking, wobei die variierenden Abstände zwischen den beiden Satelliten mit Hilfe eines Mikrowellensystems mit μm -Genauigkeit beobachtet werden. GRACE lieferte monatliche Schwerefelder und erlaubt somit, zeitliche Variationen zu analysieren (Börgens et al. 2020), deren Ursache etwa im Abschmelzen der Eismassen der großen kontinentalen Schilde (Grönland, Antarktis) liegt; allein in Grönland beträgt der Eismassenverlust für die Dauer der GRACE-Mission durchschnittlich 258 Gigatonnen pro Jahr mit einem Spitzenwert von 543 Gt/Jahr im Jahr 2012 (Tapley et al. 2019). Ein anderes Anwendungsbeispiel ist die Erfassung von Veränderungen im hydrologischen Wasserkreislauf, z. B. durch übermäßige Grundwasserentnahme im Iran oder Nordindien für Bewässerungszwecke (z. B. Eicker et al. 2016). Die Berechnung von täglichen GRACE-Lösungen kann einen Beitrag zur Verbesserung von Klimamodellen leisten (Eicker et al. 2020). Die Prozessierung der täglichen GRACE-Beobachtungen in beinahe Echtzeit kann potenziell zur Gefahrenabwehr, z. B. zur Vorhersage von Flutereignissen, genutzt werden (Gouweleeuw et al. 2018, Jäggi et al. 2019). Eine Einschränkung der letztgenannten Anwendungsfälle liegt in der geringen räumlichen Auflösung der Schwerefeldlösungen, die auf kurzen (täglichen) Beobachtungszeiten beruhen.

Die unmittelbare Nachfolge von GRACE wurde im Jahr 2018 durch die GRACE Follow-On Mission realisiert (siehe



© NASA/JPL-Caltech

Abb. 1: Künstlerische Darstellung der GRACE-FO-Mission; illustriert ist die Mikrowellenabstandsmessung zwischen den beiden Satelliten, wie sie auch bei GRACE realisiert wurde (der mittlere Strahl), sowie die neuartige Laserinterferometrie (die beiden außen verlaufenden Strahlen).

Abb. 1), die in vielen Punkten identisch zur GRACE-Mission ist. Eine der wesentlichen Neuentwicklungen dieser Mission ist die Demonstration von Laserinterferometrie zur Abstandsmessung der Satelliten mit einem Rauschen von $10 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Abich et al. 2019). Das Laser Ranging Interferometer (LRI) basiert auf Entwicklungen im Rahmen des LISA Gravitationswellendetektors in Hannover. Das LRI ermöglicht eine Verbesserung der Abstandsmessung um mehrere Größenordnungen im Vergleich zu der weiterhin als Hauptinstrument eingesetzten Mikrowellenabstandsmessung. Aufgrund nicht hinreichend gemessener oder modellierter Einflüsse, wie etwa hochfrequente atmosphärische oder ozeanische Massenänderungen, kann das volle Potenzial des LRI jedoch noch nicht voll ausgenutzt werden (Ghobadi-Far et al. 2020).

Da bei den bisherigen Satellitenmissionen weder die räumliche noch zeitliche Auflösung ausreicht, um die Anforderungen in den diversen Geo-Disziplinen zu erfüllen und die komplexen, interagierenden Prozesse zu verstehen (Pail et al. 2015), werden fortlaufend Konzepte für weitere Generationen von Schwerfeldmissionen erarbeitet. Ziel ist es, eine höhere Auflösung, eine bessere Genauigkeit und generell längere Zeitreihen zu erhalten. In Teilen basieren diese Studien auf dem Stand der Technik der GRACE(-FO)-Mission und variieren Bahnparameter oder kombinieren mehrere Satellitenpaare auf verschiedenen Orbits, um dieses Ziel zu erreichen (Elsaka et al. 2014, NGGM-D Team 2014, Pail et al. 2019, Haagmans et al. 2020, Purkhauser et al. 2020). Ein zweiter Ansatz untersucht den Beitrag verbesserter Sensoren, ohne notwendigerweise die Satellitenanzahl zu erhöhen. Ein besonderes Augenmerk dieser Studien liegt auf atominterferometrischen Beschleunigungsmessern (Abrykosov et al. 2019, Schilling et al. 2021) und Gradiometern (Douch et al. 2018, Trimeche et al. 2019, Müller und Wu 2020), einer Technik, deren Grundzüge bisher maximal als Experiment auf Hö-

henforschungsraketen demonstriert wurden (Lachmann et al. 2021).

Die ganz feinen Strukturen im Schwerfeld kann man nicht vom Weltraum aus erfassen; sie werden durch terrestrische Messungen ergänzt. Hier kommen Gravimeter, wie das FG5X von Micro-g LaCoste (Abb. 2), zum Einsatz. Über gleichzeitige Zeit- und Abstandsmessung eines in einer Vakuumröhre freifallenden Reflektors wird mit Laserinterferometrie der lokale Schwerewert g bestimmt. Man erreicht Genauigkeiten von ca. $2 \mu\text{gal}$ ($= 20 \text{ nm s}^{-2}$), wobei man dafür etwa zwei Tage beobachten muss, um systematische Fehler, z.B. aufgrund seismischer Störungen, zu reduzieren. Aus Wiederholungsmessungen lassen sich für den Aufstellungsort zeitabhängige Massenvariationen bestimmen. Ein Beispiel ist die fennoskandische Landhebung, die über mehrjährige Messkampagnen (Gitlin 2009) erfasst wurde. Die gesamte Zeitreihe absolutgravimetrischer Messungen in dieser Region erstreckt sich über drei Jahrzehnte (Olsson et al. 2019). Vergleiche mit GRACE-Analysen (Steffen et al. 2009) und mit geophysikalischen Modellierungen (Timmen et al. 2012) zeigen noch Differenzen, speziell in den Randbereichen, in denen die Signale geringer sind. Um das Phänomen als Ganzes zu verstehen, sind die diversen Datentypen zu kombinieren (Müller et al. 2012). Die skandinavischen Kollegen haben auch geometrische GNSS-Beobachtungen und Nivellements in die Lösung für ihr neues Landhebungsmodell NKG2016LU integriert (Vestøl et al. 2019).

Um nun noch höhere Genauigkeiten oder eine bessere Auflösung zu erreichen, wurde in den letzten Jahren an ganz neuen Konzepten für Messmethoden auf der Erde und im Weltraum gearbeitet. Die Nutzung der Laserinter-



Schilling und Timmen 2016

Abb. 2: Absolutgravimeter FG5X-220 des Instituts für Erdmessung bei einer Messung an der TU Clausthal, Institut für Geophysik

ferometrie im Weltraum zur präzisen Abstandsmessung zwischen zwei Satelliten wurde bereits erwähnt (siehe z. B. auch Reubelt et al. 2014). Der Kern einer weiteren Methode ist die Atominterferometrie, die auch heute schon zur terrestrischen Schweremessung genutzt werden kann, indem bei freifallenden Atomen (Quanten) die Methode der Interferometrie von Materiewellen angewendet wird. Außerdem können mit Hilfe präziser Atomuhren, die mit Glasfaserkabeln verbunden sind, unter Ausnutzung der Relativitätstheorie Potenzialunterschiede im Schwerfeld gemessen werden. Die beiden zuletzt genannten innovativen Methoden werden im Folgenden näher erläutert.

2 Atominterferometrische Gravimetrie

Bei einem Quantengravimeter lässt man nicht-makroskopische Objekte wie Retroreflektoren fallen, sondern Atome oder Atomwolken; für eine relativ einfache Beschreibung siehe Schilling et al. (2012). Die Atome werden zunächst stark gekühlt, um die thermische Eigenbewegung der Atome und somit die Ausbreitung der Atomwolke zu reduzieren (Abb. 3).

Die Atome werden in einer magneto-optischen Falle (»MOT«) gefangen und auf wenige μKelvin bis hin zu nanoKelvin (nK) gekühlt. Nach Abschalten der Falle beginnt der freie Fall in einer evakuierten Fallkammer. Die Atome werden mit einem Puls zweier gegenläufiger Laserstrahlen manipuliert, was zum Aufteilen der Atomwolke führt (statistisch etwa die Hälfte der Atome laufen dann auf einem versetzten Weg); der Laserimpuls fungiert dabei wie ein Strahlteiler bei der klassischen Laserinterferometrie. Nach einer gewissen Zeit T werden die Atome wieder mit einem Laserpuls »abgelenkt« (der Spiegel des Atominterferometers), sodass sie sich nach der Zeit $2T$ treffen und interferieren (der abschließende Strahlteiler). Die beobachtete Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ der Materiewelle ist dann direkt proportional der lokalen Schwerebeschleunigung g (k_{eff} ist der effektive Wellenvektor des Laserlichtes, der senkrecht auf der Wellenfront steht):

$$\Delta\varphi = -k_{\text{eff}} g T^2. \quad (1)$$

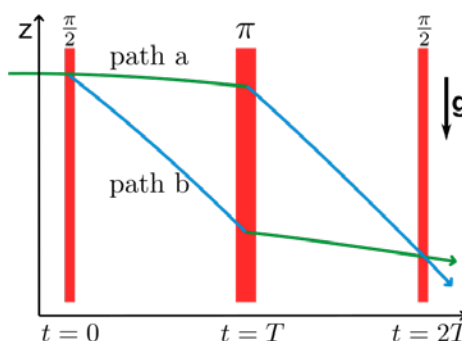
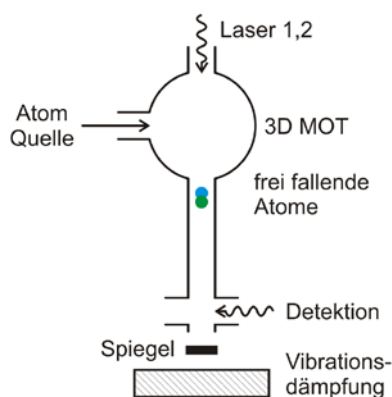


Abb. 3:
Links: Schematischer Aufbau eines Atomgravimeters (aus Schilling et al. 2012), rechts: Schema der Atominterferometrie für die Bestimmung der Schwerebeschleunigung g

Der Vorteil einer atominterferometrischen Schweremessung besteht darin, dass zusätzlich zur sehr hohen Längenauflösung manche systematischen Effekte entfallen, da keine makroskopischen Objekte (freifallendes Prisma, aktiv gesteuerte »mitfallende« Transportkammer gegen atmosphärische Reibung) bewegt werden, die instrumentelle Vibrationen und damit Störbeschleunigungen verursachen. Die hohe Abtastfrequenz von meist unter 1 Hz ermöglicht eine Mittelbildung zur Reduzierung vorhandener Mikroseismik innerhalb weniger Minuten, sodass schnell ein Schwerewert $g = |g|$ mit der Genauigkeit von $1 \mu\text{gal}$ erhalten wird. Die schnellere Vermessung ermöglicht neue Beobachtungskonzepte. Aktuelle Entwicklungen laufen an der Leibniz Universität Hannover (LUH) sowie an der Humboldt Universität Berlin (Hauth et al. 2013, Heine et al. 2020). Ein erstes kommerzielles Quantengravimeter, das sogenannte Absolute Quantum Gravimeter AQG, wird durch die französische Firma Muquans vertrieben (Cooke et al. 2021, Güntner et al. 2021). Das Berliner Gravimetric Atom Interferometer (GAIN) arbeitet nach dem Wurf-Prinzip. Vergleichsmessungen mit klassischen Gravimetern, etwa 2015 in Onsala (Abb. 4, Freier et al. 2016), zeigen das hohe Potenzial atominterferometrischer Gravimeter deutlich. Das am Institut für Quantenoptik an der LUH entwickelte QG-1 setzt als erstes Gravimeter das Bose-Einstein Kondensat als freifallende Testmasse ein (Abb. 4, Heine et al. 2020). Diese Wahl bedingt durch die niedrigere Temperatur im Bereich weniger nK eine geringere Ausbreitung der Atomwolke und hat eine Reduktion bestimmter systematischer Effekte einer Messung zur Folge. Man kann diese Quantensensoren sowohl als Absolutgravimeter einsetzen, die einen absoluten lokalen Schwerewert g in sehr kurzer Zeit liefern, wie auch als registrierende Gravimeter, um über einen längeren Zeitraum Schwerevariationen zu erfassen. Somit verknüpft dieser neuartige Gravimetertyp die Vorteile eines transportablen Absolut- und eines stationären Supraleit-Gravimeters in einem Gerät. Dieses Messkonzept könnte außerdem aufgrund seiner Qualitäten künftig als neuer Standard für Schweremessungen dienen und würde auch die präzise Bestimmung von Kalibrierparametern für supraleitende Gravimeter mit besserer Genauigkeit erlauben.

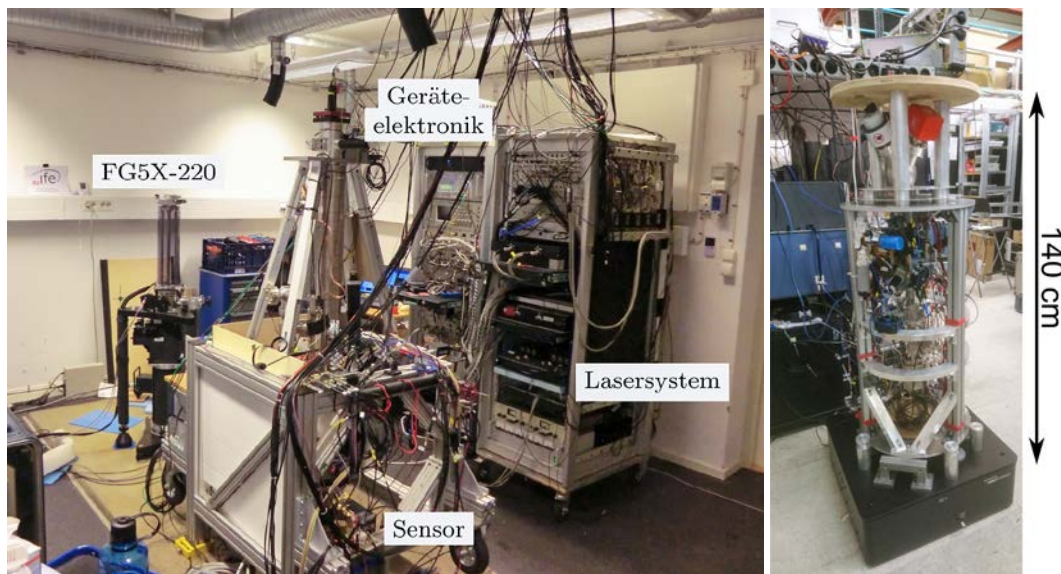


Abb. 4:
Links: Das Quantengravimeter GAIN während der Messung in Onsala; rechts: QG-1 Sensor bei Integration im Labor (Herr et al. 2021)

Aus Formel (1) wird deutlich, dass durch eine Verlängerung der Zeit T eine höhere Sensitivität eines Quantensensors erreicht werden kann. Für transportable Instrumente wird T durch die mögliche Baugröße begrenzt. Bei GAIN liegt T zwischen 250 ms bis 300 ms. Daher sind an verschiedenen Universitäten, z.B. Stanford und Wuhan, stationäre Atominterferometer mit einer Ausdehnung über mehrere Meter für Experimente in der Fundamentalphysik entstanden. An der Leibniz Universität Hannover wird im Rahmen des Hannover Institute of Technology aktuell ein insgesamt 15 m hohes Atominterferometer, das Very Long Baseline Atom Interferometer (VLBAI, Schlipfert et al. 2020) installiert, das auch für geodätische Anwendungen eingesetzt werden kann. Die Baugröße erlaubt eine Zeit T von bis zu 1,2 s in einer 8 m umfassenden Zone des VLBAI (Wodey et al. 2021). Bereits die Bauphase des Laborgebäudes und des VLBAI wird durch geometrische

und gravimetrische Messungen begleitet (Schilling et al. 2020). Diese Messungen sind notwendig, um den Fehlerhaushalt des VLBAI in verschiedenen Experimenten, z. B. aufgrund des Schweregradienten, abzuschätzen. Zusätzlich sollen mit dem VLBAI gemessene Schwerewerte in andere Labore übertragen werden, um Gravimetervergleiche durchzuführen, in denen das VLBAI als Referenz dient. In diesem Zusammenhang soll untersucht werden, ob das VLBAI als metrologische Referenz der Schwere dienen kann, die bisher durch Gruppenvergleiche mit einer größeren Anzahl an Teilnehmern dargestellt wird (Schilling und Timmen 2016).

In der Satellitengravimetrie – etwa bei mit GRACE-FO vergleichbaren Missionsszenarien – stellt derzeit die Messung der nicht-gravitativen Beschleunigungen, die auf den Satelliten einwirken, einen begrenzenden Faktor dar (u.a. atmosphärische Reibung, Strahlungsdruck der Sonne). Eine weitere Verbesserung des Distanzmesssystems über das LRI hinaus hat nur noch minimale Auswirkungen auf die räumliche oder zeitliche Auflösung der Schwerfeldlösungen (siehe Abb. 5). Eine Verbesserung der Beschleunigungsmesser hingegen, insbesondere eine deutliche Reduzierung der Drift in niedrigen Frequenzen, hat eine Reduktion systematischer Fehler in den Schwerfeldlösungen zur Folge. Dieses angestrebte Frequenzverhalten kann durch den Einsatz atominterferometrischer Beschleunigungsmesser realisiert werden (Abrykov et al. 2019).

In der terrestrischen Anwendung zeigt sich z. B. bei GAIN weißes Rauschen in einem breiten Frequenzbereich (Freier et al. 2016), sodass ein vergleichbares Verhalten auch bei Satellitenanwendungen erwartet wird. Zunächst wird eine Kombination beider Techniken in einem hybriden Beschleunigungsmesser angestrebt. Die gelbe Fläche in Abb. 5 zeigt die Verbesserung bei niedrigen Frequenzen, die bereits bei der Kombination bestehender Beschleunigungsmesser mit einer konservativen Annahme eines atominterferometrischen Beschleunigungsmessers erreicht werden könnte. So können längere Messzeiten des Atom-

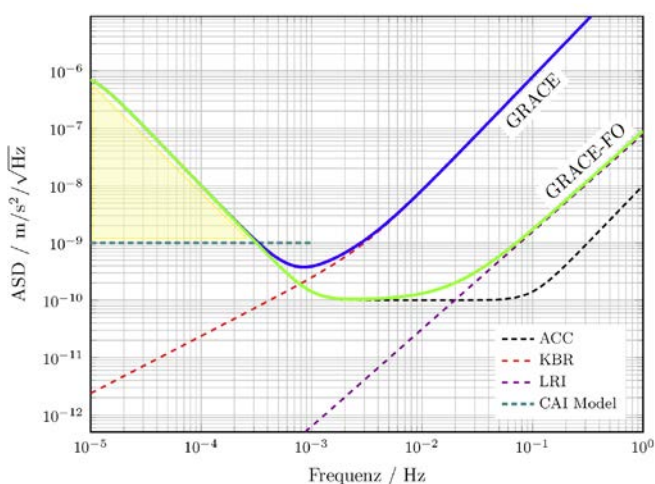


Abb. 5: Dominierende Fehlerquellen in Range Accelerations (Daras und Pail 2017) der GRACE(-FO)-Satellitenmissionen mit Beschleunigungsmesser (ACC) und Mikrowellen- bzw. Laserdistanzmesssystem (KBR, LRI). Die Kombination mit einem Quantenbeschleunigungsmesser (CAI Model) zeigt den Raum für potenzielle Verbesserungen (gelbe Fläche).

interferometers im Bereich einiger Sekunden zur Steigerung der Sensitivität realisiert werden, und es steht weiterhin ein Signal mit einer Frequenz von deutlich über 1 Hz des elektrostatischen Beschleunigungsmessers für andere Aufgaben wie der Korrelation mit den LRI-Messungen zur Detektion von Phasensprüngen (Abich et al. 2019) oder der Regelung einer Drag-Kompensation in tiefer fliegenden Satelliten zur Verfügung. Gleichzeitig ermöglicht dieser Ansatz die Kalibrierung des elektrostatischen Beschleunigungsmessers durch die Messung des Atominterferometers (Cheiney et al. 2018).

Diese Messtechnologie, basierend auf Atominterferometrie, liefert nicht nur Schwerebeschleunigungen, sondern kann in einem entsprechenden Aufbau auch kinematische Beschleunigungen, inklusive Rotationsbeschleunigungen erfassen, was wiederum interessante Anwendungen in der Navigation eröffnet. Der große Vorteil hier ist, dass die Atominterferometrie im idealen Fall keine Drift aufweist und genutzt werden kann, um die Drift der hochfrequenten Messungen der klassischen inertialen Messeinheit auszugleichen (Gersemann et al. 2020, Tennstedt und Schön 2021).

3 Relativistische Geodäsie mit Uhren

Als weiteres innovatives Konzept in der Geodäsie bieten sich hochpräzise Uhren für die Schwerefeld- bzw. Höhenbestimmung an (z. B. Lisdat et al. 2018, Müller et al. 2018). Die folgende Herleitung orientiert sich an Müller (2017). Die Gangraten der Uhren hängen gemäß der Einsteinschen Theorie vom Gravitationspotenzial U am Ort der Uhr und von deren Geschwindigkeit v ab (Einstein 1916, Moyer 1981). Es gilt für das Verhältnis der Eigenzeit τ der Uhr und der Koordinatenzeit t in erster nach-Newtonscher Näherung:

$$\frac{d\tau}{dt} = 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} - \frac{U}{c^2}. \quad (2)$$

c ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Diese Zusammenhänge sind längst bekannt und werden etwa auch in der Auswertung der geodätischen Weltraumverfahren berücksichtigt, bei GNSS sogar hardwaremäßig korrigiert (Ashby 2002). Inzwischen ist die Genauigkeit der Uhren, speziell optischer Uhren, so hoch, dass man grundsätzlich einen Gangratenunterschied der Uhren aufgrund der Änderung des Schwerepotenzials bei einer Höhenvariation von wenigen Zentimetern messen kann (Lisdat et al. 2016, Grotti et al. 2018, Takamoto et al. 2020). Auf diese Möglichkeit hat bereits Bjerhammar (1985) hingewiesen, der auch den Begriff »chronometric leveling« für diese Verfahren einführte (siehe auch Petit und Wolf 1997, Mai 2013, Mai und Müller 2013, Wu et al. 2019).

Betrachtet man die Eigenfrequenzen zweier Uhren, die sich auf der Erdoberfläche befinden, und fasst den

Anteil aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit der Erde am jeweiligen Uhrenstandort und das zugehörige Gravitationspotenzial zum Schwerepotenzial W zusammen, erhält man

$$\frac{df_2}{df_1} = \frac{d\tau_1}{d\tau_2} = 1 - \frac{\Delta W_{12}}{c^2}. \quad (3)$$

$\Delta W_{12} = W_{P1} - W_{P2}$ gibt die Schwerepotenzialdifferenz zwischen den beiden Uhrenstandorten an. Die Eigenfrequenzen f der Uhren sind indirekt proportional zu den Eigenzeiten τ . Klassischerweise werden in der Geodäsie physikalische Höhen, also Höhen, die einen Bezug zum Erdschwerefeld haben, aus kombinierten Nivellements und Schweremessungen bestimmt. Zunächst wird aus den nivellierten Höhenunterschieden Δn und den Schweremessungen g entlang der Nivellementlinie eine geopotenzielle Kote berechnet:

$$C_p = - \int_0^p g dn = \sum_0^p g \Delta n. \quad (4)$$

Die geopotenzielle Kote entspricht der Differenz des Schwerepotenzials W zwischen dem Geoid und dem Punkt P , also $C_p = W_0 - W_p$. In der Praxis treten mit dieser Methode diverse Probleme auf: Die Fehler des Nivellements wachsen mit der Entfernung; während die Genauigkeit über kurze Distanzen noch im Sub-Millimeterbereich liegt, kann sie über 1000 km in den Zentimeter- und Dezimeterbereich ansteigen. Die Nivellements in größeren Gebieten, z. B. den Bundesländern in Deutschland, wurden zu ganz unterschiedlichen Epochen beobachtet; es können Jahrzehnte dazwischenliegen, was zu systematischen Effekten führen kann. Schließlich ist anzumerken, dass das Verfahren sehr zeitaufwendig ist, wenn große Entfernungen und/oder Höhenunterschiede überbrückt werden müssen. Dies potenziert sich noch, falls Höhenänderungen erwartet werden und Wiederholungsmessungen durchgeführt werden müssen (Feldmann-Westendorff et al. 2016).

Die in Deutschland gebräuchliche Normalhöhe H^N ist für einen Oberflächenpunkt P definiert (siehe Abb. 6; Torge und Müller 2012) gemäß

$$H_p^N = \frac{C_p}{\bar{\gamma}}. \quad (5)$$

Die geopotenzielle Kote C_p wird hier durch die mittlere Normalschwere $\bar{\gamma}$ dividiert, die entlang der Normalotlinie zum Ellipsoid gegeben ist. Meist werden Differenzen zwischen zwei Punkten verwendet, da bei einem bekannten Höhenpunkt angeschlossen werden kann. Dann werden nur noch Differenzen von geopotenziellen Koten $\Delta C_{21} = C_{P2} - C_{P1}$ benötigt, die bis auf das Vorzeichen wiederum identisch mit den Schwerepotenzialunterschieden $\Delta W_{21} = -\Delta C_{21}$ sind. Für die Höhendifferenz zwischen zwei Punkten gilt somit $(\Delta \bar{\gamma}_{12} = \bar{\gamma}_{P1} - \bar{\gamma}_{P2})$

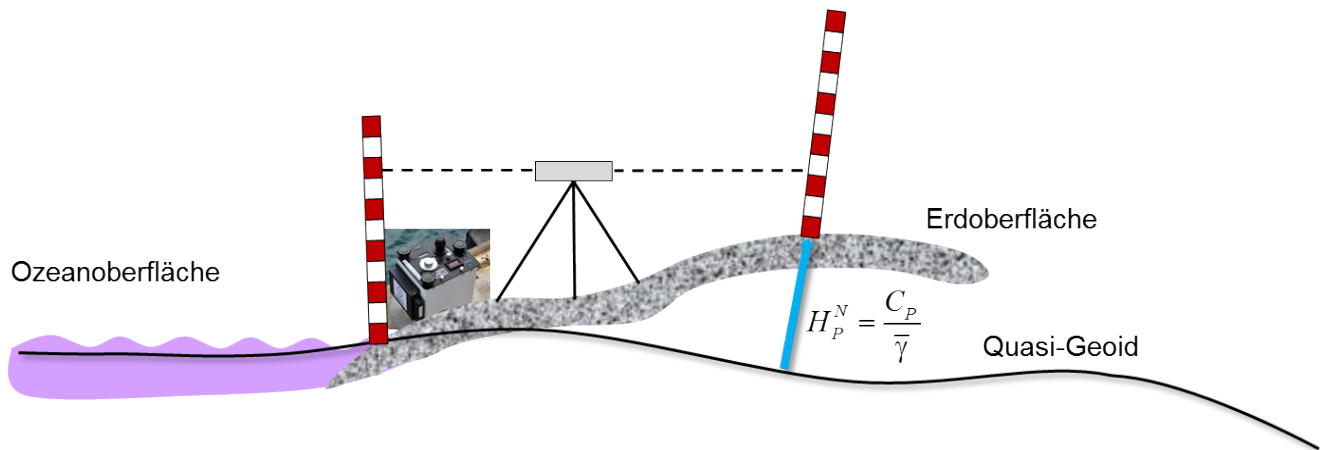


Abb. 6: Definition der Normalhöhe und Messung mittels Nivellement und Gravimetrie. Das Quasi-Geoid ist die Höhenbezugsfläche für Normalhöhen. Es ist eine Näherung an das Geoid, die sich durch die Lösung der Randwertaufgabe nach Molodenskii ergibt (Torge und Müller 2012). Das Quasigeoid stimmt über dem Ozean praktisch mit dem Geoid überein. Für orthometrische Höhen kann eine entsprechende Skizze mit dem Geoid als Höhenbezugsfläche gezeichnet werden.

$$\Delta H_{21}^N = H_2^N - H_1^N = H_1^N \frac{\Delta \bar{\gamma}_{12}}{\bar{\gamma}_2} + \frac{\Delta C_{21}}{\bar{\gamma}_2} \quad (6)$$

bzw. für den »Neupunkt« P_2

$$H_2^N = H_1^N \frac{\bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_2} - \frac{\Delta W_{21}}{\bar{\gamma}_2}. \quad (7)$$

Die Potenzialunterschiede $\Delta W_{21} = W_{p2} - W_{p1}$ können gemäß Gleichung (3) aus Frequenzunterschieden $\Delta f_{21} = f_{p2} - f_{p1}$, die mit hochpräzisen Uhren gemessen werden, gewonnen werden, und man erhält schließlich

$$H_2^N = H_1^N \frac{\bar{\gamma}_1}{\bar{\gamma}_2} - \frac{c^2}{\bar{\gamma}_2} \frac{\Delta f_{21}}{f_1}. \quad (8)$$

Wenn die relative Frequenz $\Delta f_{21}/f_1$ mit einer Genauigkeit von 10^{-18} gemessen wird, entspricht dies einer Höhen Genauigkeit von 1 cm. Viele der oben beim Nivellement angesprochenen Fehlerquellen spielen hier keine Rolle mehr. Die Genauigkeit der Schwerepotenzialmessung mit Uhren ist unabhängig von der Entfernung. Es wurde außerdem gezeigt, dass die Verbindung der Uhren für kontinentale Entfernungen mit hinreichender Genauigkeit über Glasfaserkabel realisiert werden kann (Droste et al. 2013, Xu et al. 2018), dadurch also keine weiteren Fehler auftreten. Weiterhin kann mit Hilfe dieses Messverfahrens die Qualität der gängigen Methoden der Geoid- bzw. Quasi-Geoid-Bestimmung (geometrisch versus gravimetrisch) kontrolliert werden (siehe z. B. Denker et al. 2018).

Auch andere physikalische Höhen lassen sich mit Hilfe der Frequenzmessungen mit Uhren bestimmen (Müller et al. 2018). Für orthometrische Höhen gilt:

$$H_2 = H_1 \frac{\bar{g}_1}{\bar{g}_2} - \frac{c^2}{\bar{g}_2} \frac{\Delta f_{21}}{f_1}. \quad (9)$$

\bar{g}_1 und \bar{g}_2 entsprechen den mittleren Schwerewerten entlang der gekrümmten Lotlinien zwischen Geoid und den Oberflächenpunkten 1 und 2. Bei den Uhrenvergleichen – gerade bei diesem Genauigkeitsniveau – ist aus geodätischer Sicht noch darauf zu achten, jegliche zeitvariablen Anteile, die an den verschiedenen Uhrenstandorten unterschiedlich wirken, konsistent zu korrigieren. Zum Beispiel macht der Effekt durch die festen Erdzeiten zwischen Braunschweig und London 8 cm aus, was deutlich über der oben genannten Genauigkeit liegt (Voigt et al. 2016, worin auch weitere Effekte diskutiert werden); Leßmann und Müller (2018) untersuchen den Einfluss nicht-zeitenbedingter ozeanischer Auflasten im Nordseebereich auf die Uhrenmessungen.

Man erwartet, dass man innerhalb der nächsten fünf Jahre transportable Uhren hat, mit denen die Messung von Höhenunterschieden mit 1 cm Genauigkeit möglich ist. Aktuelle Studien (Wu et al. 2019) zeigen, dass Uhrennetzwerke exzellent dazu genutzt werden können, um Diskrepanzen in klassischen Realisierungen von Höhensystemen aufzulösen und lokale und regionale Höhensysteme konsistent zu vereinigen.

Ebenso wird es Uhren im Weltraum geben, die via dedizierter Links miteinander verbunden sind (Dix-Matthews et al. 2021). Mit dieser Technologie wird das chronometrische Nivellement als Standardtechnik für die Höhenbestimmung in der Geodäsie etabliert sein, und man wird über neue Konzepte zur Realisierung eines Welthöhensystems basierend auf Frequenzen nachdenken (Wu und Müller 2020).

Die Bestimmung von langwelligen Anteilen des Schwerfeldes kann mit geeigneten Weltraumuhren möglich werden (Müller und Wu 2020), wobei selbst zeitvariable Anteile erfassbar scheinen.

Künftige Uhrennetzwerke ermöglichen die Validierung der Ergebnisse von Satellitenmissionen wie GRACE, etwa hydrologisch bedingte Massenvariationen (Schröder et al. 2021). Falls Uhren in Grönland oder im Einzugsgebiet des

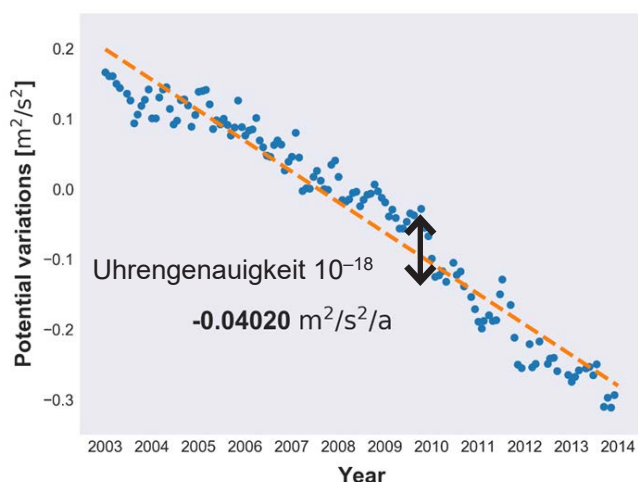


Abb. 7: Der Massenverlust an einem ausgewählten Punkt im südlichen Grönland. Die Punkte geben die monatlichen GRACE-Ergebnisse für diesen Ort an, die einen Trend von $-0,04 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{Jahr}$ für die Potenzialänderung ergeben. Der schwarze Doppelpfeil gibt die Messgenauigkeit von Uhren an, wie sie heute bereits in Laboren erreicht wird. Nicht nur der Trend, sondern auch saisonale Schwankungen könnten mit Uhrmessungen sehr gut erfasst werden.

Amazonas platziert werden, lassen sich der Eismassenverlust bzw. die Massenänderungen durch die Regenzeiten signifikant erfassen; siehe auch Abb. 7, die von Wu und Müller (2021) adaptiert wurde. Der Vorteil der Uhrenmessungen ist dabei, dass punktweise Daten vorliegen, während sie bei den Satellitenmissionen über große Flächen (zwischen 40.000 km^2 und 100.000 km^2) gemittelt sind. Außerdem kann eine viel höhere zeitliche Auflösung von wenigen Tagen erzielt werden, wohingegen der Standard bei Satelliten ein Monat ist.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die genannten Entwicklungen zur atominterferometrischen Schweremessung und zur Erfassung von Schwerepotenzialdifferenzen mit präzisen optischen Uhren haben großes Interesse in der Geodäsie geweckt. Mittels fallender Atome die Schwerkraft oder aus der unterschiedlichen Tickrate von Uhren Höhenpotenziale auszumessen, ist Realität geworden. Durch die gezielte Nutzung dieser neuen Technologien lassen sich neue Messkonzepte etablieren, die deren Vorteile (wie gleichzeitige Absolut- und Relativgravimetrie oder direkte Messung von Potenzialdifferenzen) ausnutzen. Nur die enge interdisziplinäre Kooperation zwischen Physik und Geodäsie erlaubt eine optimale Entwicklung und Anwendung solcher neuer verbesserter Messmethoden für die Schwerefeldbestimmung. Durch die konsequente Anwendung der Quantenphysik und der Relativitätstheorie werden neue Werkzeuge für die Erdbeobachtung entstehen, die für nahezu alle Geo-Disziplinen vorteilhaft sein werden. Der Geodäsie kommt hier eine entscheidende Rolle zu, um dieses Potenzial wirklich auszuschöpfen.

Grundlegende Arbeiten in diesem Sinne laufen im DFG-Sonderforschungsbereich SFB 1464 »Relativistic and Quantum-based Geodesy (TerraQ)« und dem Exzellenzcluster EXC 2123 »QuantumFrontiers« an der Leibniz Universität Hannover. Die erste Phase des SFB 1464 hat im Januar 2021 begonnen, weitergehende Informationen finden sich auf www.terraq.uni-hannover.de. Ebenfalls in Hannover ist das im Jahr 2019 neu gegründete Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) angesiedelt, das auch an dem genannten SFB beteiligt ist und darüber hinaus neue Konzepte für die gravimetrische Erdbeobachtung vom Weltraum aus erforscht.

Die internationale Geodäsie hat gleichfalls das große Potenzial der Quantentechnologie und der Nutzung neuartiger Messkonzepte für die Geodäsie erkannt. Im Jahr 2019 hat die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) das neue globale Projekt »Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy (QuGe)« gestartet, siehe auch <https://quge.iag-aig.org>. In diesem IAG-Projekt sind drei Arbeitsgruppen eingerichtet, in denen die neuen Konzepte in internationaler Kooperation erforscht und künftige Anwendungen für die Geodäsie erarbeitet werden.

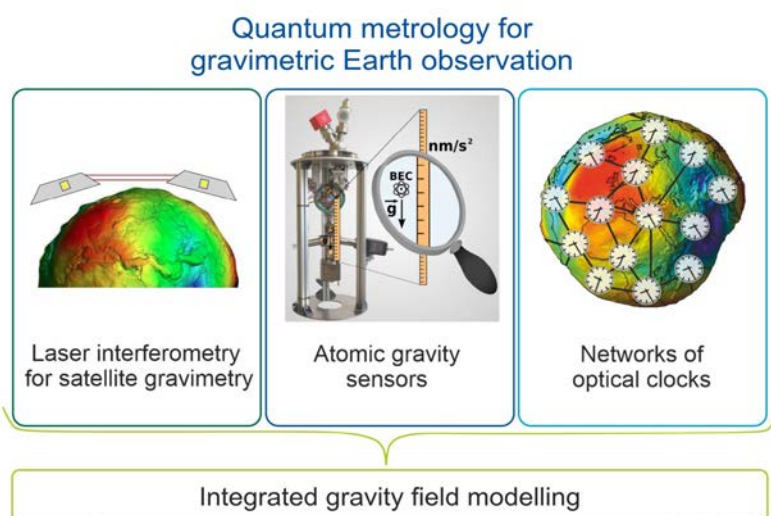


Abb. 8: Symbolisierung der Kernforschungsbereiche des SFB 1464 TerraQ: Laserinterferometrie für künftige Schwerfeldsatellitenmissionen, Quantengravimetrie und relativistische Geodäsie mit Uhren; siehe auch www.terraq.uni-hannover.de

Dank

Ein großer Dank für die vielfältigen Forschungsarbeiten in den angesprochenen Themenbereichen geht an unsere Kollegen vom Institut für Erdmessung (IfE). Teile der Arbeit

im Zusammenhang mit dem Quantengravimeter GAIN wurden nur durch die gute Kooperation mit den Kollegen Achim Peters und Christian Freier von der Humboldt-Universität zu Berlin ermöglicht. Die Entwicklung des Quantengravimeter QG-1 ist eine Zusammenarbeit des Instituts für Quantenoptik (Hardwareentwicklung) und des Instituts für Erdmessung (Anwendungen) der Leibniz Universität Hannover. Die Studien zur Verwendung von Quantensensoren auf Satelliten am IfE wurden durch das Land Niedersachsen im Rahmen des Programms »Niedersächsisches Vorab« als Anschubfinanzierung für das DLR-Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik gefördert und werden durch das DLR-Institut weiter teilfinanziert. Gefördert werden diese Arbeiten, unter anderem, durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2123 »QuantumFrontiers« – 390837967 und den Sonderforschungsbereich 1464 »TerraQ« – 434617780.

Literatur

- Abich, K., Abramovici, A., Amparan, B., Baatzsch, A., Okihiro, B.B., Barr, D.C., Bize, M.P., Bogan, C., Braxmaier, C., Burke, M.J., Clark, K.C., Dahl, C., Dahl, K., Danzmann, K., Davis, M.A., Vine, G. de, Dickson, J.A., Dubovitsky, S., Eckardt, A., Ester, T., Barranco, G.F., Flatscher, R., Flechtner, F., Folkner, W.M., Francis, S., Gilbert, M.S., Gilles, F., Gohlke, M., Grossard, N., Guenther, B., Hager, P., Hauden, J., Heine, F., Heinzel, G., Herding, M., Hinz, M., Howell, J., Katsumura, M., Kaufer, M., Klipstein, W., Koch, A., Kruger, M., Larsen, K., Lebeda, A., Lebeda, A., Leikert, T., Liebe, C.C., Liu, J., Lobmeyer, L., Mahrtdt, C., Mangoldt, T., McKenzie, K., Misfeldt, M., Morton, P.R., Müller, V., Murray, A.T., Nguyen, D.J., Nicklaus, K., Pierce, R., Ravich, J.A., Reavis, G., Reiche, J., Sanjuan, J., Schütze, D., Seiter, C., Shaddock, D., Sheard, B., Sileo, M., Spero, R., Spiers, G., Stede, G., Stephens, M., Sutton, A., Trinh, J., Voss, K., Wang, D., Wang, R.T., Ware, B., Wegener, K., Windisch, S., Woodruff, C., Zender, B., Zimmermann, M. (2019): In-orbit performance of the GRACE Follow-On Laser Ranging Interferometer. In: *Physical Review Letters*, Heft 3/2019, Jg. 123, 031101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.031101.
- Abrykosov, P., Pail, R., Gruber, T., Zahzam, N., Bresson, A., Hardy, E., Christophe, B., Bidel, Y., Carraz, O., Siemes, C. (2019): Impact of a novel hybrid accelerometer on satellite gravimetry performance. In: *Advances in Space Research*, Heft 10/2019, Jg. 63, 3235–3248. DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.034.
- Ashby, N. (2002): Relativity and the Global Positioning System. In: *Physics Today*, Heft 5/2002, Jg. 55, 41–47. DOI: 10.1063/1.1485583.
- Bjerhammar, A. (1985): On a relativistic geodesy. In: *Bulletin Géodésique*, Heft 3/1985, Jg. 59, 207–220. DOI: 10.1007/BF02520327.
- Börgens, E., Dahle, C., Döbslaw, H., Groh, A., Sasgen, I., Reißland, S., Flechtner, F. (2020): Globale Massenverteilungen aus Satellitengravimetrie: Das interaktive Datenportal GravIS. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 5/2020, Jg. 145, 279–286. DOI: 10.12902/zfv-0316-2020.
- Brockmann, J.M., Schubert, T., Schuh, W.-D. (2021): An improved model of the Earth's static gravity field solely derived from reprocessed GOCE data. In: *Surveys in Geophysics*, Heft 2/2021, Jg. 42, 277–316. DOI: 10.1007/s10712-020-09626-0.
- Cheiney, P., Fouché, L., Templier, S., Napolitano, F., Battelier, B., Bouyer, P., Barrett, B. (2018): Navigation-compatible hybrid quantum accelerometer using a Kalman filter. In: *Physical Review Applied*, Heft 3/2018, Jg. 10, 034030. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.10.034030.
- Cooke, A.-K., Champollion, C., Le Moigne, N. (2021): First evaluation of an absolute quantum gravimeter (AQG#B01) for future field experiments. In: *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions*, Heft Nr. 1/2021, Jg. 10, 65–79. DOI: 10.5194/gi-10-65-2021.
- Daras, I., Pail, R. (2017): Treatment of temporal aliasing effects in the context of next generation satellite gravimetry missions. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Heft 9/2017, Jg. 122, 7343–7362. DOI: 10.1002/2017JB014250.
- Denker, H., Timmen, L., Voigt, C., Weyers, S., Peik, E., Margolis, H.S., Delva, P., Wolf, P., Petit, G. (2018): Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10^{-18} in the context of international timescales: a review and practical results. In: *Journal of Geodesy*, Heft 5/2018, Jg. 92, 487–516. DOI: 10.1007/s00190-017-1075-1.
- Dix-Matthews, B.P., Schediwy, S.W., Gozzard, D.R., Savalle, E., Esnault, F.-X., Lévêque, T., Gravestock, C., D'Mello, D., Karpathakis, S., Tobar, M., Wolf, P. (2021): Point-to-point stabilized optical frequency transfer with active optics. In: *Nature Communications*, Jg. 12, 515. DOI: 10.1038/s41467-020-20591-5.
- Douch, K., Wu, H., Schubert, C., Müller, J., Pereira dos Santos, F. (2018): Simulation-based evaluation of a cold atom interferometry gradiometer concept for gravity field recovery. In: *Advances in Space Research*, Heft 5/2018, Jg. 61, 1307–1323. DOI: 10.1016/j.asr.2017.12.005.
- Droste, S., Ozimek, F., Udem, T., Predehl, K., Hänsch, T.W., Schnatz, H., Grosche, G., Holzwarth, R. (2013): Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link. In: *Physical Review Letters*, Heft 11/2013, Jg. 111, 110801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.110801.
- Eicker, A., Forootan, E., Springer, A., Longuevergne, L., Kusche, J. (2016): Does GRACE see the terrestrial water cycle “intensifying”? In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Heft 2/2016, Jg. 121, 733–745. DOI: 10.1002/2015JD023808.
- Eicker, A., Jensen, L., Wöhnke, V., Döbslaw, H., Kvas, A., Mayer-Gürr, T., Dill, R. (2020): Daily GRACE satellite data evaluate short-term hydro-meteorological fluxes from global atmospheric reanalyses. In: *Scientific Reports*, Heft Nr. 1/2020, Jg. 10, 4504. DOI: 10.1038/s41598-020-61166-0.
- Einstein, A. (1916): Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. In: *Annalen der Physik*, Heft 7/1916, Jg. 354, 769–822. DOI: 10.1002/andp.19163540702.
- Elsaka, B., Raimondo, J.-C., Brieden, P., Reubelt, T., Kusche, J., Flechtner, F., Iran Pour, S., Sneeuw, N., Müller, J. (2014): Comparing seven candidate mission configurations for temporal gravity field retrieval through full-scale numerical simulation. In: *Journal of Geodesy*, Heft Nr. 1/2014, Jg. 88, 31–43. DOI: 10.1007/s00190-013-0665-9.
- Feldmann-Westendorff, U., Liebsch, G., Sacher, M., Müller, J., Jahn, C.-H., Klein, W., Liebig, A., Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 5/2016, Jg. 141, 354–367. DOI: 10.12902/zfv-0140-2016.
- Freier, C., Hauth, M., Schkolnik, V., Leykauf, B., Schilling, M., Wziontek, H., Scherneck, H.-G., Müller, J., Peters, A. (2016): Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability. In: *Journal of Physics: Conference Series*, Band 723, 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/723/1/012050.
- Gersemann, M., Gebbe, M., Abend, S., Schubert, C., Rasel, E.M. (2020): Differential interferometry using a Bose-Einstein condensate. In: *The European Physical Journal D*, Heft 10/2020, Jg. 74, 203. DOI: 10.1140/epjd/e2020-10417-8.
- Ghobadi-Far, K., Han, S.-C., McCullough, C.M., Wiese, D.N., Yuan, D.-N., Landerer, F.W., Sauber, J., Watkins, M.M. (2020): GRACE Follow-On Laser Ranging Interferometer measurements uniquely distinguish short-wavelength gravitational perturbations. In: *Geophysical Research Letters*, Heft 16/2020, Jg. 47, e2020GL089445. DOI: 10.1029/2020GL089445.

- Gitlein, O. (2009): Absolutgravimetrische Bestimmung der Fennoskanischen Landhebung mit dem FG5-220. Dissertation. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 281, Leibniz Universität Hannover.
- Gouweleeuw, B.T., Kvas, A., Gruber, C., Gain, A.K., Mayer-Gürr, T., Flechtner, F., Güntner, A. (2018): Daily GRACE gravity field solutions track major flood events in the Ganges–Brahmaputra Delta. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, Heft 5/2018, Jg. 22, 2867–2880. DOI: 10.5194/hess-22-2867-2018.
- Grotti, J., Koller, S., Vogt, S., Häfner, S., Sterr, U., Lisdat, C., Denker, H., Voigt, C., Timmen, L., Rolland, A., Baynes, F.N., Margolis, H.S., Zampalo, M., Thoumany, P., Pizzocaro, M., Rauf, B., Bregolin, F., Tampellini, A., Barbieri, P., Zucco, M., Costanzo, G.A., Clivati, C., Levi, F., Calonico, D. (2018): Geodesy and metrology with a transportable optical clock. In: *Nature Physics*, Heft 5/2018, Jg. 14, 437–441. DOI: 10.1038/s41567-017-0042-3.
- Güntner, A., Reich, M., Reinhold, A., Gläsel, J., Wziontek, H. (2021): First experiences with an absolute quantum gravimeter during field campaigns. EGU General Assembly 2021, 19.–30.04.2021, online. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14072.
- Haagmans, R., Siemes, C., Massotti, L., Carraz, O., Silvestrin, P. (2020): ESA's next-generation gravity mission concepts. In: *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, Jg. 31, 15–25. DOI: 10.1007/s12210-020-00875-0.
- Hauth, M., Freier, C., Schkolnik, V., Senger, A., Schmidt, M., Peters, A. (2013): First gravity measurements using the mobile atom interferometer GAIN. In: *Applied Physics B*, Heft Nr. 1/2013, Jg. 113, 49–55. DOI: 10.1007/s00340-013-5413-6.
- Heine, N., Matthias, J., Sahelgozin, M., Herr, W., Abend, S., Timmen, L., Müller, J., Rasel, E.M. (2020): A transportable quantum gravimeter employing delta-kick collimated Bose-Einstein condensates. In: *European Physics Journal D*, Jg. 74, 174. DOI: 10.1140/epjd/e2020-10120-x.
- Herr, W., Heine, N., Musakaev, M., Abend, S., Timmen, L., Müller, J., Rasel, E.M. (2021): First gravity data acquired by the transportable absolute Quantum Gravimeter QG-1 employing collimated Bose-Einstein condensates. EGU General Assembly 2021, 19.–30.04.2021, online. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-15458.
- Jäggi, A., Weigelt, M., Flechtner, F., Güntner, A., Mayer-Gürr, T., Martinis, S., Bruinsma, S., Flury, J., Bourgeois, S., Steffen, H., Meyer, U., Jean, Y., Sušnik, A., Grahl, A., Arnold, D., Cann-Guthauser, K., Dach, R., Li, Z., Chen, Q., van Dam, T., Gruber, C., Poropat, L., Gouweleeuw, B., Kvas, A., Klinger, B., Lemoine, J.-M., Biancale, R., Zwenzner, H., Bandikova, T., Shabanlou, A. (2019): European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM) – from concept to implementation. In: *Geophysical Journal International*, Heft 3/2019, Jg. 218, 1572–1590. DOI: 10.1093/gji/ggz238.
- Lachmann, M.D., Ahlers, H., Becker, D., Dinkelaker, A.N., Grosse, J., Hellmig, O., Müntinga, H., Schkolnik, V., Seidel, S.T., Wendrich, T., Wenzlawski, A., Carrick, B., Gaaloul, N., Lüdtke, D., Braxmaier, C., Ertmer, W., Krutzik, M., Lämmerzahl, C., Peters, A., Schleich, W.P., Sengstock, K., Wicht, A., Windpassinger, P., Rasel, E.M. (2021): Ultracold atom interferometry in space. In: *Nature Communications*, Heft Nr. 1/2021, Jg. 12, 1317. DOI: 10.1038/s41467-021-21628-z.
- Leßmann, L., Müller, J. (2018): Analysis of non-tidal ocean loading for gravitational potential observations in northern Europe. In: *Journal of Geodynamics*, Jg. 119, 23–28. DOI: 10.1016/j.jog.2018.05.008.
- Lisdat, C., Grosche, G., Quintin, N., Shi, C., Raupach, S.M.F., Grebing, C., Nicolodi, D., Stefani, F., Al-Masoudi, A., Dörscher, S., Häfner, S., Robyr, J.-L., Chiodo, N., Bilicki, S., Bookjans, E., Koczwara, A., Koke, S., Kuhl, A., Wiotte, F., Meynadier, F., Camisard, E., Abgrall, M., Lours, M., Legero, T., Schnatz, H., Sterr, U., Denker, H., Chardonnet, C., Le Coq, Y., Santarelli, G., Amy-Klein, A., Le Targat, R., Lodewyck, J., Lopez, O., Pottie, P.-E. (2016): A clock network for geodesy and fundamental science. In: *Nature Communications*, Heft Nr. 1/2016, Jg. 7, 12443. DOI: 10.1038/ncomms12443.
- Lisdat, C., Müller, J., Schmidt, P.O. (2018): Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie. In: *PTB Mitteilungen*, Heft 3/2018, Jg. 128, 17–25. DOI: 10.7795/310.20180303.
- Mai, E. (2013): Time, atomic clocks and relativistic geodesy. BAdW, München, DGK Reihe A, Nr. 124. <http://publikationen.badw.de/de/023386397>, letzter Zugriff 28.05.2021.
- Mai, E., Müller, J. (2013): General remarks on the potential use of atomic clocks in relativistic geodesy. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jg. 138, Heft 4/2013, 257–266. <https://geodaesie.info/zfv/heftbeitrag/1764>, letzter Zugriff 13.05.2021.
- Moyer, T.D. (1981): Transformation from proper time on Earth to coordinate time in solar system barycentric space-time frame of reference: Part 1. In: *Celestial Mechanics*, Heft Nr. 1/1981, Jg. 23, 33–56. DOI: 10.1007/BF01228543.
- Müller, J. (2017): Erdmessung mit Quanten und Relativität. In: *Jahrbuch 2016 der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft*. Braunschweig, J. Cramer Verlag, 238–251. DOI: 10.24355/dbbs.084-201708031022-0.
- Müller, J., Dirx, D., Kopeikin, S.M., Lion, G., Panet, I., Petit, G., Visser, P.N.A.M. (2018): High performance clocks and gravity field determination. In: *Space Science Reviews*, Jg. 214, 5. DOI: 10.1007/s11214-017-0431-z.
- Müller, J., Naeimi, M., Gitlein, O., Timmen, L., Denker, H. (2012): A land uplift model in Fennoscandia combining GRACE and absolute gravimetry data. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Jg. 53–54, 54–60. DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.006.
- Müller, J., Wu, H. (2020): Using quantum optical sensors for determining the Earth's gravity field from space. In: *Journal of Geodesy*, Heft 8/2020, Jg. 94, 71. DOI: 10.1007/s00190-020-01401-8.
- NGGM-D Team (2014): e².motion – Earth system mass transport mission (Square) – Concept for a next generation gravity field mission – final report of project “Satellite Gravimetry of the Next Generation (NGGM-D)”. BAdW, München, DGK Reihe B, Nr. 318. <http://publikationen.badw.de/de/042499507>, letzter Zugriff 28.05.2021.
- Olsson, P.-A., Breili, K., Ophaug, V., Steffen, H., Bilker-Koivula, M., Nielsen, E., Oja, T., Timmen, L. (2019): Postglacial gravity change in Fennoscandia – three decades of repeated absolute gravity observations. In: *Geophysical Journal International*, Heft 2/2019, Jg. 217, 1141–1156. DOI: 10.1093/gji/ggz054.
- Pail, R., Bamber, J., Biancale, R., Bingham, R., Braitenberg, C., Eicker, A., Flechtner, F., Gruber, T., Güntner, A., Heinzel, G., Horwath, M., Longuevergne, L., Müller, J., Panet, I., Savenije, H., Seneviratne, S., Sneeuw, N., van Dam, T., Wouters, B. (2019): Mass variation observing system by high low inter-satellite links (MOBILE) – a new concept for sustained observation of mass transport from space. In: *Journal of Geodetic Science*, Heft Nr. 1/2019, Jg. 9, 48–58. DOI: 10.1515/jogs-2019-0006.
- Pail, R., IUGG writing team (2015): Observing mass transport to understand global change and to benefit society: Science and user needs. An international multi-disciplinary initiative for IUGG. BAdW, München, DGK Reihe B, Nr. 320. <http://publikationen.badw.de/en/044436255>, letzter Zugriff 28.05.2021.
- Petit, G., Wolf, P. (1997): Computation of the relativistic rate shift of a frequency standard. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Heft 2/1997, Jg. 46, 201–204. DOI: 10.1109/19.571812.
- Purkhauser, A.F., Siemes, C., Pail, R. (2020): Consistent quantification of the impact of key mission design parameters on the performance of next-generation gravity missions. In: *Geophysical Journal International*, Heft 2/2020, Jg. 221, 1190–1210. DOI: 10.1093/gji/ggaa070.
- Reubelt, T., Sneeuw, N., Iran Pour, S., Hirth, M., Fichter, W., Müller, J., Brieden, P., Flechtner, F., Raimondo, J.-C., Kusche, J., Elsaka, B., Gruber, T., Pail, R., Murböck, M., Doll, B., Sand, R., Wang, X., Klein, V., Lezius, M., Danzmann, K., Heinzel, G., Sheard, B., Rasel, E., Gilowski, M., Schubert, C., Schäfer, W., Rathke, A., Dittus, H., Piliavan, I. (2014): Future gravity field satellite missions. In: *Flechtner, F.*

- Sneeuw, N., Schuh, W.-D. (Hg.): Observation of the system Earth from space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions, GEOTECHNOLOGIEN Science Report, Band 20. Berlin, Heidelberg, Springer, 165–230. DOI: 10.1007/978-3-642-32135-1_21.
- Rummel, R., Yi, W., Stummer, C. (2011): GOCE gravitational gradiometry. In: *Journal of Geodesy*, Heft 11/2011, Jg. 85, 777–790. DOI: 10.1007/s00190-011-0500-0.
- Schilling, M., Knabe, A., Wu, H., Müller, J. (2021): Cold atom interferometer accelerometry for future satellite gravimetry missions. 43rd COSPAR Scientific Assembly, 28.01.–04.02.2021, online.
- Schilling, M., Müller, J., Timmen, L. (2012): Einsatz der Atominterferometrie in der Geodäsie. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jg. 137, Heft 3/2012, 185–194. <https://geodaesie.info/zfv/heftbeitrag/822>, letzter Zugriff 13.05.2021.
- Schilling, M., Timmen, L. (2016): Traceability of the Hannover FG5X-220 to the SI Units. In: Freymueller, J. T., Sánchez, L. (Hg.): *International Symposium on Earth and Environmental Sciences for Future Generations, International Association of Geodesy Symposia*, Band 147. Cham, Springer, 69–75. DOI: 10.1007/1345_2016_226.
- Schilling, M., Wodey, É., Timmen, L., Tell, D., Zipfel, K. H., Schlippert, D., Schubert, C., Rasel, E. M., Müller, J. (2020): Gravity field modeling for the Hannover 10 m atom interferometer. In: *Journal of Geodesy*, Heft 12/2020, Jg. 94, 122. DOI: 10.1007/s00190-020-01451-y.
- Schlippert, D., Meiners, C., Rengelink, R. J., Schubert, C., Tell, D., Wodey, É., Zipfel, K. H., Ertmer, W., Rasel, E. M. (2020): Matter wave interferometry for inertial sensing and tests of fundamental physics. In: Lehnert, R. (Hg.): *Proceedings of the Eighth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry*. Indiana University, Bloomington, USA, 12.–16.05.2019, 37–40. DOI: 10.1142/9789811213984_0010.
- Schröder, S., Stellmer, S., Kusche, J. (2021): Potential and scientific requirements of optical clock networks for validating satellite-derived time-variable gravity data. In: *Geophysical Journal International*, Heft 2/2021, Jg. 226, 764–779. DOI: 10.1093/gji/ggab132.
- Steffen, H., Gitlein, O., Denker, H., Müller, J., Timmen, L. (2009): Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry. In: *Tectonophysics*, Heft Nr. 1-2/2009, Jg. 474, 69–77. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.01.012.
- Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Yahagi, T., Kokado, K., Shinkai, H., Katori, H. (2020): Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. In: *Nature Photonics*, Jg. 14, 411–415. DOI: 10.1038/s41566-020-0619-8.
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Chambers, D. P., Reager, J. T., Gardner, A. S., Save, H., Ivins, E. R., Swenson, S. C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D. N., Dobslaw, H., Tamisiea, M. E., Velicogna, I. (2019): Contributions of GRACE to understanding climate change. In: *Nature Climate Change*, Heft 5/2019, Jg. 9, 358–369. DOI: 10.1038/s41558-019-0456-2.
- Tennstedt, B., Schön, S. (2021): Integration of atom interferometers and inertial measurement units to improve navigation performance. In: *Proceedings of 28th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 31.05.–02.06.2021, St. Petersburg, Russia. Piscataway, NJ, IEEE. DOI: 10.15488/11023.
- Timmen, L., Gitlein, O., Klemann, V., Wolf, D. (2012): Observing gravity change in the Fennoscandian uplift area with the Hanover absolute gravimeter. In: *Pure and Applied Geophysics*, Heft 8/2012, Jg. 169, 1331–1342. DOI: 10.1007/s00024-011-0397-9.
- Torge, W., Müller, J. (2012): *Geodesy*. 4. Aufl. Berlin, Boston, de Gruyter.
- Trimeche, A., Battelier, B., Becker, D., Bertoldi, A., Bouyer, P., Braxmaier, C., Charron, E., Corgier, R., Cornelius, M., Douch, K., Gaaloul, N., Herrmann, S., Müller, J., Rasel, E., Schubert, C., Wu, H., Pereira dos Santos, F. (2019): Concept study and preliminary design of a cold atom interferometer for space gravity gradiometry. In: *New Journal of Physics*, Heft 21/2019, Jg. 36, 215004. DOI: 10.1088/1361-6382/ab4548.
- Vestøl, O., Ågren, J., Steffen, H., Kierulf, H., Tarasov, L. (2019): NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. In: *Journal of Geodesy*, Heft 9/2019, Jg. 93, 1759–1779. DOI: 10.1007/s00190-019-01280-8.
- Voigt, C., Denker, H., Timmen, L. (2016): Time-variable gravity potential components for optical clock comparisons and the definition of international time scales. In: *Metrologia*, Heft 6/2016, Jg. 53, 1365–1383. DOI: 10.1088/0026-1394/53/6/1365.
- Wodey, É., Rengelink, R. J., Meiners, C., Rasel, E. M., Schlippert, D. (2021): A robust, high-flux source of laser-cooled ytterbium atoms. In: *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, Heft 3/2021, Jg. 54, 035301. DOI: 10.1088/1361-6455/abd2d1.
- Wu, H., Müller, J., Lämmerzahl, C. (2019): Clock networks for height system unification: a simulation study. In: *Geophysical Journal International*, Heft 3/2019, Jg. 216, 1594–1607. DOI: 10.1093/gji/ggy508.
- Wu, H., Müller, J. (2020): Towards an international height reference frame using clock networks. In: *IUGG2019 General Assembly, International Association of Geodesy Symposia*. Berlin, Heidelberg, Springer. DOI: 10.1007/1345_2020_97.
- Wu, H., Müller, J. (2021): Clock networks and their sensibility to time-variable gravity signals. *EGU General Assembly 2021*, 19.–30.04.2021, online. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-10744.
- Xu, D., Lee, W.-K., Stefani, F., Lopez, O., Amy-Klein, A., Pottie, P.-E. (2018): Studying the fundamental limit of optical fiber links to the 10^{-21} level. In: *Optics Express*, Heft 8/2018, Jg. 26, 9515. DOI: 10.1364/OE.26.009515.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller
Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, 30167 Hannover
mueller@ife.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Manuel Schilling
Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
c/o Leibniz Universität Hannover, Callinstrasse 36, 30167 Hannover
manuel.schilling@dlr.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.