

# Gravimetrische Erfassung von Klimawandelprozessen

Geodäsie nutzt technologische Entwicklungen der Quantenphysik

Die enge interdisziplinäre Kooperation zwischen Physik und Geodäsie erlaubt die Entwicklung und Anwendung neuartiger gravimetrischer Messmethoden, um klimarelevante Massenvariationen auf der Erde zu erfassen.

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller vom Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover und Dr.-Ing. Manuel Schilling vom Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt geben einen Überblick über die Möglichkeiten, die die quanten-basierte Geodäsie für die Klimaforschung bietet.

## Einführung

Klimawandelprozesse, wie das Abschmelzen der großen Eisschilde, übermäßiger Grundwasserverbrauch oder Meeresspiegeländerungen, zeigen sich oft in Massenvariationen, die man sehr gut gravimetrisch erfassen kann. Dazu gibt es ausgefeilte Satellitenmesstechniken, wie die GRACE-Mission, oder terrestrische Messverfahren. Das verfügbare Datenmaterial ist jedoch zeitlich und räumlich stark limitiert.

Hier ermöglichen aktuelle technologische Entwicklungen in der Quantenphysik neuartige Anwendungen und Messkonzepte in der Geodäsie und der gravimetrischen Erdbeobachtung (Müller und Schilling 2021). So können etwa mittels frei-fallender Atome (gravimetrische) Beschleunigungen oder – gemäß der Einstein'schen Relativitätstheorie – aus Frequenzvergleichen hochgenauer optischer Uhren Höhendifferenzen gemessen werden. Global eigenen sich spezielle Konstellationen von Satelliten und die präzise laser-interferometrische Abstandsmessung zwischen ihnen, um großräumige Massenvariationen und damit wesentliche Indikatoren für klimabedingte Veränderungen zu bestimmen.

## Auswirkungen des Klimawandels

Die Klimaänderung hat dramatische Auswirkungen auf die Umwelt und unser tägliches Leben. Durch die globale Erwärmung treten häufigere und stärkere Hitzewellen auf. Durch zunehmende Trockenheit und Dürren sind die Menschen in vielen Gebieten, etwa in Nordindien und im Nahen Osten gezwungen, verstärkt tiefe Grundwasserspeicher zur Bewässerung zu nutzen, mit verheerenden langfristigen Folgen. Ozeanerwärmung und Meeresspiegelanstieg werden vermehrt zu Überflutungen und stärkeren Wirbelstürmen beitragen. Küstennahe Gewässer werden mehr und mehr versalzen. Die Gletscher der großen Eispanzer und in den alpinen Regionen schmelzen schnell. In Sibirien und Nordamerika werden durch Änderungen im Permafrost sehr große Mengen der schädlichen Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) freigesetzt. Schwindender Permafrost im Hochgebirge führt zu Hangrutschungen. Für Nord-, Mittel und Westeuropa wird ein Anstieg der Niederschlagsextremereignisse und damit verbundene Überflutungen vorhergesagt. Für den Mittelmeerraum zeigt sich ein gegenläufiger Trend mit einer weiteren Zunahme der Trockenheit in den kommenden Jahrzehnten. Diese Phänomene treten unabhängig vom

Einhalten des „1.5°C Ziels“ bereits heute auf und werden sich bei einem weiteren Temperaturanstieg verstärken.

Viele dieser Prozesse sind mit Massenänderungen verbunden, die man mit gravimetrischen Methoden sehr gut erfassen kann. Mit solchen geodätischen Daten kann man die klimabedingten Änderungsprozesse und die komplexen Wechselwirkungen nicht nur quantifizieren und damit besser verstehen, sondern auch wesentlich zu Vorhersagemodellen über weitere Verläufe beitragen (IPCC 2021). Die Geodäsie ist hier gefordert, bessere Daten zu liefern (Müller und Pail 2019).

## Gravimetrische Messmethoden

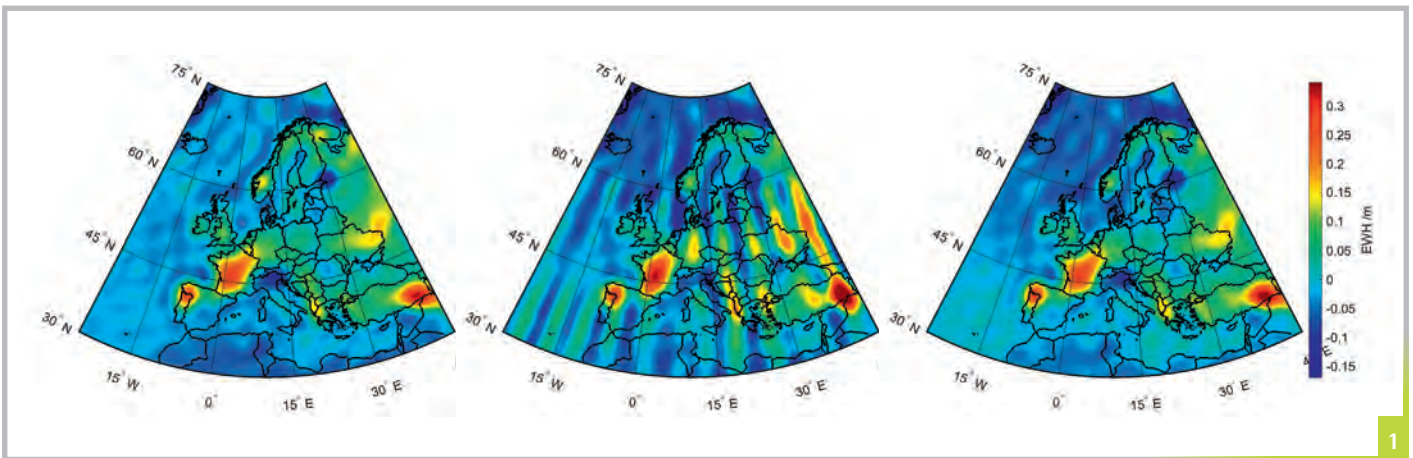
Für die globale Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variationen des Schwerefeldes wurden seit 2000 spezielle Satellitenmissionen realisiert. Zur Bestimmung von Massenvariationen hat die Mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) beziehungsweise deren Nachfolgerin GRACE-FO die größte Bedeutung.

Aus monatlichen GRACE-Schwerefeldern konnten vielfältige zeitliche Massenvariationen bestimmt werden, etwa das Abschmelzen der Eismassen der großen kontinentalen Schilde in Grönland und in der Antarktis). Allein in Grön-

land 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, zum Beispiel durch übermäßige Grundwasserentnahme im Iran oder Nordindien für Bewässerungszwecke.

in der Atmosphäre und den Ozeanen nicht gut genug modelliert werden können. Zum anderen gelingt es nicht, die nicht-gravitativen Störungen der Satellitenbahnen hinreichend genau zu bestimmen. Die hierfür bislang genutzten elektrostatischen Beschleunigungsmesser zeigen langwellige Fehler. Diese Fehler könnte man durch eine optische Abtastung der Testmasse deutlich reduzieren, woran

die Beschleunigung  $g$ , bestimmt werden. Als wesentlicher Fortschritt wird die im Vergleich zu einem klassischen Beschleunigungsmesser hohe zeitliche Stabilität eines Atominterferometers gesehen. Dies hat eine Reduktion der langwelligen Fehler zur Folge (Abbildung 1). Auch komplexere Konstellationen von Satelliten und die zugehörige Bestimmung von Bahnstörungen würde die Erfassung von globalen klima-



Die Berechnung von täglichen GRACE-Lösungen kann einen Beitrag zur Verbesserung von Klimamodellen leisten. Deren Prozessierung in beinahe Echtzeit kann potenziell zur Gefahrenabwehr, beispielsweise zur Vorhersage von Flutereignissen, genutzt werden.

Eine Einschränkung der letztgenannten Anwendungsfälle liegt in der relativ geringen zeitlichen (Standard ist ein Monat) sowie räumlichen Auflösung der Schwerfeldlösungen im Bereich von einigen 100 Kilometern. GRACE-FO könnte durch die Nutzung eines Laserinterferometers für die präzise Abstandsmessung zwischen den beiden Satelliten in Nanometerbereich potenziell bessere Ergebnisse liefern. Aber diese enorme Messgenauigkeit kann nur eingeschränkt genutzt werden, da zum einen schnell ablaufende Massenvariationen

im SFB 1464 TerraQ an der LUH geforscht wird. Weiterhin bietet sich für künftige Satellitenmissionen der Einsatz von atominterferometrischen Sensoren an, die diese Einschränkung nicht haben. Ziel führend ist eine hybride Nutzung, um die Vorteile von beiden zu nutzen. Atominterferometer nutzen eine Sequenz aus gepulstem Laserlicht, das unter dem Einfluss lokaler Beschleunigungen mit frei fallenden Atomen interagiert. Diese Interaktionen verändern die Zustände der Atome, so dass nach der Messsequenz die Atome in zwei definierten Zuständen vorliegen, die detektiert werden. Aus dem Mengenverhältnis beider atomarer Zustände kann die lokale Beschleunigung, im Fall des Satelliten die nicht-gravitativen Störbeschleunigungen oder im Fall eines Quantengravimeters die lokale Schwerebeschleuni-

relevanten Massenvariationen deutlich verbessern.

Kleinräumige Massenvariationen, wie die Veränderung von lokalen Grundwasserspeichern, lassen sich nur mit terrestrischen Verfahren hinreichend überwachen. Auch hier liefert die Nutzung von Atominterferometern als Quantengravimeter enorme Vorteile, siehe Abbildung 2. Man kann nicht nur präziser messen, sondern auch viel schneller, was ganz neue Möglichkeiten für die entsprechende gravimetrische Vermessung von Untersuchungsgebieten erlaubt. Mit diesen verbesserten Schweredaten lassen sich die Veränderungsprozesse besser modellieren, und sie können auch für Prognosen der weiteren Entwicklung genutzt werden.

Um die genannten komplexen Änderungen auf der Erde –

Abbildung 1  
Links: Massenvariationen (ESA Earth System Model) in Europa im Zeitraum eines halben Jahres; Mitte: Bei Bestimmung unter Nutzung von elektrostatischen Beschleunigungsmessern treten langwellige, streifenförmige Fehler auf; rechts: Bei künftiger Nutzung hybrider Beschleunigungsmesser wäre dieser Fehlereinfluss stark reduziert.  
Quelle: DLR/IFE

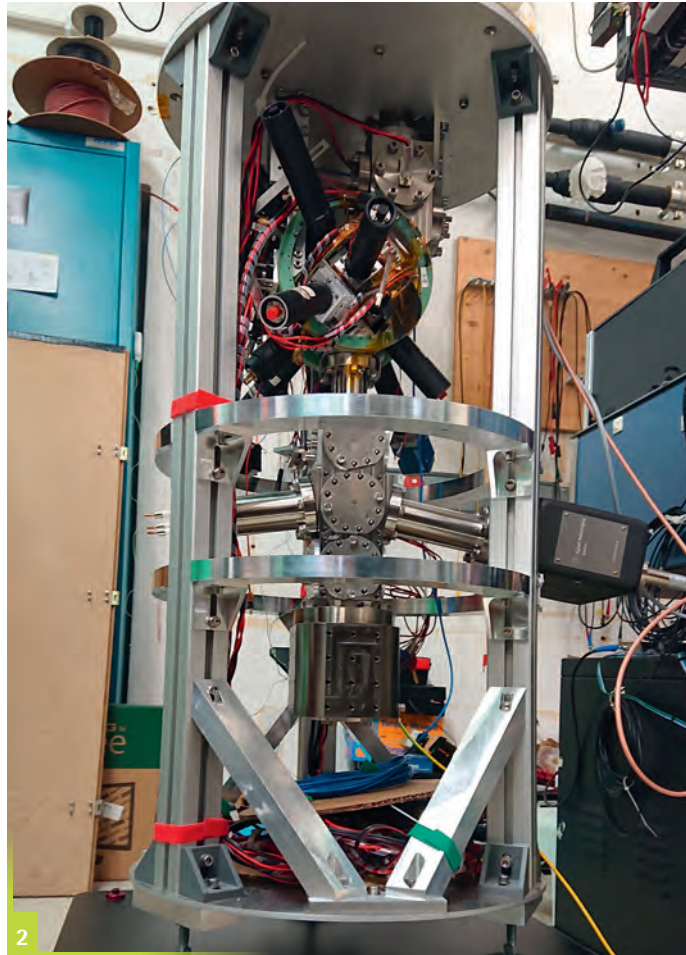


Abbildung 2  
Quantengravimeter QG1,  
das im Rahmen des SFB 1464  
TerraQ am Institut für Quanten-  
optik entwickelt wird.  
Foto: N. Heine,  
Institut für Quantenoptik

denken Sie etwa an den Meeresspiegelanstieg – zu trennen und separat zu quantifizieren, ist eine stabile Referenz notwendig. Diese kann künftig durch Uhrennetzwerke realisiert werden. Dabei wird die von Albert Einstein entwickelte Relativitätstheorie genutzt. Demnach ticken die Uhren mit unterschiedlicher Frequenz, abhängig von ihrer Geschwindigkeit und ihrer Distanz zu Massen. Uhren auf der Erde gehen also unterschiedlich schnell, je nachdem ob sie näher oder weiter von ihr entfernt sind, also höher oder niedriger stehen. Heutzutage kann man aus Frequenzvergleichen bereits Höhenunterschiede von unter einem Zentimeter messen. Damit hat man ein einmaliges geodätisches Werkzeug, um Höhensysteme einzurichten und unabhängige Höhenreferenzen, zum Beispiel an Meerespegeln, anzugeben. Treten Massenvariationen auf, könnten diese ebenfalls über eine längerfristige Registrierung mit den Uhren gemessen werden.

### Koordinierte Forschung am Standort Hannover

Durch die konsequente Anwendung der Quantenphysik und der Relativitätstheorie lassen sich also neue geodätische Messkonzepte für die Erdbeobachtung entwickeln, die deren Vorteile nutzen und einmaliges Datenmaterial für die Klimaforschung zur Verfügung stellen werden. Vielfältige Arbeiten in diesem Kontext sind via größerer Forschungsverbünde an der Leibniz Universität Hannover organisiert:

**TerraQ** Grundlagenforschung wird im DFG-Sonderforschungsbereich SFB 1464 „Relativistic and Quantum-based Geodesy (TerraQ)“ durchgeführt, der 2021 begonnen hat, siehe [www.terraq.uni-hannover.de](http://www.terraq.uni-hannover.de).

Unterstützt wird diese Forschung durch den Exzellenzcluster EXC 2123 „QuantumFrontiers“, [www.quantumfrontiers.de](http://www.quantumfrontiers.de).



**FZ:GEO** Die Verbindung zu den Anwendungen und den weiteren Geowissenschaften erfolgt unter anderem über das Leibniz Forschungszentrum FZ:GEO, [www.geo.uni-hannover.de](http://www.geo.uni-hannover.de).

Darüber hinaus erforscht das Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) am Standort Hannover neue Konzepte für die gravimetrische Erdbeobachtung aus dem Weltraum, [www.dlr.de/si](http://www.dlr.de/si).





Für weitergehende Erläuterungen zu den genannten Messmethoden siehe Müller und Schilling (2021) und die darin angegebenen Referenzen.

**Literatur**

IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. (Hrsg). Cambridge University Press

Müller J, Pail R (2019) Erdmessung 2030. zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 144:4–16. <https://doi.org/10.12902/zfv-0243-2018>

Müller J, Schilling M (2021) Neue Messmethoden für die gravimetrische Erdbeobachtung. ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. <https://doi.org/10.12902/zfv-0368-2021>

Tapley BD, Watkins MM, Flechtner F, et al (2019) Contributions of GRACE to understanding climate change. Nature Climate Change 9:358–369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>



**Prof. Jürgen Müller**

Jahrgang 1962, ist Professor für Physikalische Geodäsie und Sprecher des DFG Sonderforschungsbereichs 1464 TerraQ. Er beschäftigt sich seit vielen Jahrzehnten mit geodätischen Forschungsthemen an der Schnittstelle zur Physik, um neuartige Technologien und Messmethoden für die Geodäsie und die gravimetrische Erdbeobachtung zu erforschen und anzuwenden. Kontakt: [mueller@ife.uni-hannover.de](mailto:mueller@ife.uni-hannover.de)



**Dr.-Ing. Manuel Schilling**

Jahrgang 1976, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V. in der Abteilung Satellitengeodäsie und geodätische Modellierung. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt in der Modellierung von quantensensor-gestützten Satellitenmissionen zur Vermessung des Schwerefeldes der Erde. Kontakt: [manuel.schilling@dlr.de](mailto:manuel.schilling@dlr.de)

INTERGEO<sup>®</sup>  
2022 OCT. 18 – 20  
ESSEN  
HYBRID

INSPIRATION  
FOR A SMARTER WORLD

**DVW** Veranstalter / Host: DVW e.V.  
Ausrichter Conference / Conference organiser: DVW GmbH  
Ausrichter Expo / Expo organiser: HINTE GmbH

[WWW.INTERGEO.DE](http://WWW.INTERGEO.DE)

[y](#) [t](#) [f](#) [in](#) [@](#)

JETZT TICKET  
KOSTENFREI  
SICHERN!

GUTSCHEINCODE: IG22-ALPHA