

## ■ Kompakt und kostengünstig

Ein neuartiges Gravimeter verspricht die Möglichkeit des mobilen Einsatzes zur Messung des Schwerefeldes.

Dr. Felipe Guzmán Cervantes, National Institute of Standards and Technology & Joint Quantum Institute, University of Maryland, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA

Die hochpräzisen Messungen in der Gravitationsphysik betreffen ein breites Spektrum wissenschaftlicher Beobachtungen – von der Grundlagenforschung über Astrophysik und Geowissenschaften bis hin zur Öl- und Mineralindustrie. Die gewonnenen Erkenntnisse können sich auch auf die Politik, Wirtschaft und Gesellschaft auswirken. In den letzten Jahren gab es in der Gravitationsphysik eine Reihe revolutionärer Ergebnisse – z. B. den direkten Nachweis der ersten zwei Gravitationswellensignale [1] oder die spektakulären Ergebnisse der Weltraummission LISA Pathfinder [2], welche die Erwartungen sogar übertroffen haben.

In den meisten dieser Experimente geht es darum, die Beschleunigung zu messen. Abhängig von der Messempfindlichkeit und dem Frequenzband kommen dafür Beschleunigungsmesser, Seismometer, Gravimeter oder auch Inertialsensoren für die Navigation zum Einsatz. In der Automobilindustrie zum Beispiel dienen Beschleunigungsmesser dazu, Vibrationen bzw. Bewegungen von Objekten und Bauteilen zu vermessen. Dies geschieht mit einer Präzision von  $100 \mu\text{m}/\text{s}^2$  bis  $10 \text{ mm}/\text{s}^2$  über Frequenzen von einigen 10 Hz bis mehreren 10 kHz. In den Geowissenschaften sind Seismometer, absolute und differenzielle Gravimeter mit viel höheren Empfindlichkeiten bei meist niedrigeren Messbandbreiten nötig. Die wissenschaftlich relevanten Geräte erreichen Beschleunigungsauflösungen in der Größenordnung

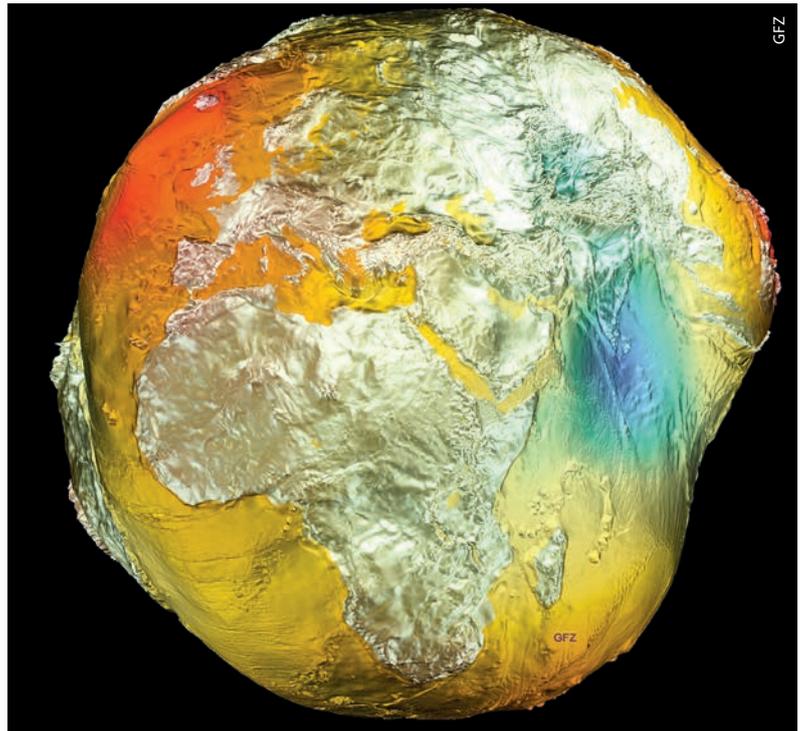


Abb. 1 Das Geoid basiert auf Daten von GOCE, GRACE und LAGEOS.

von  $10^{-10} \text{ ms}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$  bei Frequenzen unter einem Hertz.

In der Grundlagenforschung sind immer höhere Genauigkeiten erforderlich, z. B. für den Test des Äquivalenzprinzips bei der Weltraummission MICROSCOPE [3] oder für die Bestimmung der universellen Gravitationskonstante  $G$  und die Frage, warum diese sich nur mit einer vergleichsweise großen Messgenauigkeit messen lässt [4]. Weltraumtaugliche Gravity Gradiometer wie in GRACE und GOCE [5] haben es erlaubt, über lange Zeit präzise zu verfolgen, wie das Schwerefeld der Erde aufgrund von Änderungen der Land-, Wasser- und Eismassenverteilungen schwankt (Abb. 1). Dadurch war es möglich, auf den Klimawandel zu schließen. Im Weltraum entscheiden Größe und Gewicht der Sensoren über die Umsetzung der Mission.

Kommerzielle Gravimeter sind jedoch immer noch sehr massiv und teuer; sie wiegen mitunter mehrere Kilogramm und kosten fast 100 000 Euro. Einer Gruppe von der Universität Glasgow ist kürzlich ein technologischer Durchbruch

in diesem Feld gelungen [6]. Die Wissenschaftler haben ein neuartiges mikroelektromechanisches MEMS-Gravimeter entwickelt, das auf etablierten Herstellungsmethoden der Halbleiterindustrie beruht. Diese Verfahren ermöglichen eine kostengünstige Massenproduktion und kommen auch für Beschleunigungssensoren in Smartphones oder Gamecontrollern zum Einsatz. Die erzielte Empfindlichkeit von  $4 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$  reichte aus, um die Ozeangezeiten zu beobachten. Sie ist rund tausendmal höher als in Alltagssensoren, die sich beispielsweise in Airbags finden; für die Geowissenschaften ist sie allerdings noch einige Größenordnungen zu gering. Das Gerät ist deutlich günstiger und mehrere Größenordnungen leichter als kommerziell verfügbare Systeme: Mit nur wenigen Kubikzentimetern Größe eignet er sich für den mobilen Einsatz (Abb. 2).

Die Empfindlichkeit eines Beschleunigungsmessers, also auch eines Gravimeters, ist grundsätzlich durch das thermische Rauschen des mechanischen Oszillators

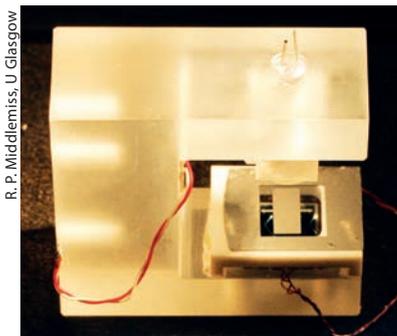


Abb. 2 Das neue MEMS-Gravimeter ist nur etwa so klein wie eine Briefmarke.

$$S^{1/2}_a = \sqrt{(8\pi k_B T f_0)/(mQ)}$$

limitiert, das aus internen Verlusten resultiert. Hierbei ist  $f_0$  die mechanische Resonanzfrequenz,  $m$  die Testmasse,  $Q$  die mechanische Güte,  $T$  die Temperatur und  $k_B$  die Boltzmann-Konstante. Typische Resonanzfrequenzen liegen zwischen einem und zehn Hertz, um die notwendige Messbandbreite zu gewährleisten.

Abgesehen von supraleitenden Gravimetern [7] und Atominterferometern [8], die natürlich sehr komplex und groß sind, arbeiten die heutigen Systeme bei Raumtemperatur. Unter diesen Bedingungen gilt: Je größer das Produkt  $mQ$  ist, desto niedriger ist  $S^{1/2}_a$ , d. h. desto höher ist die Empfindlichkeit. Hohe Güten von über 1000 zu erreichen, ist in solchen Systemen eine große Herausforderung aufgrund der Geometrie und der Verluste in den Materialien. Abhängig von der Elastizität und dem Reinheitsgrad des Materials, von der Topologie des Oszillators und der Dämpfung strahlt der Oszillator durch Wechselwirkung mehr oder weniger Energie an die Umgebung ab. Daher besitzen traditionelle Gravimeter meist große Testmassen, damit das Produkt  $mQ$  so groß wie möglich ist. In der Folge sind die Systeme recht sperrig.

In den Geowissenschaften oder der Industrie sollen Gravimeter häufig direkt am Messort stehen, um beispielsweise Reservoirs von

Öl, Gas und Mineralien zu identifizieren. Der Vorteil eines kompakten MEMS-Systems, wie das der schottischen Wissenschaftler, gegenüber herkömmlichen Gravimetern ist daher immens. Bislang mussten die Wissenschaftler ihr System sorgfältig unter Laborbedingungen installieren, um damit die Erdzeiten messen zu können. Aber eine weitere Entwicklung verspricht auch den mobilen Einsatz und die Möglichkeit, kleine Änderungen im Gravitationsfeld der Erde nachweisen und verfolgen zu können.

Dies verdeutlicht die Relevanz der entwickelten Technologien, nicht nur im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung, sondern auch für den industriellen Einsatz. Aufgrund des geringen Gewichts könnte das MEMS-System auch in Drohnen zum Einsatz kommen und größere Gebiete nach Anomalien im Schwerefeld absuchen.

Felipe Guzmán

- [1] B. P. Abbott et al. (LIGO Sci. Coll. und Virgo Coll.), Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016) & PRL **116**, 241103 (2016)
- [2] M. Armano et al. (LISA Pathfinder Coll.), Phys. Rev. Lett. **116**, 231101 (2016)
- [3] J. Bergé, J. Phys Conf Ser. **610**, 012009 (2015)
- [4] S. Schlamminger, Nature **510**, 478 (2014)
- [5] R. Pail et al., Geophys. Res. Lett. **37**, L20314 (2010)
- [6] R. P. Middlemiss et al., Nature **531**, 614 (2016)
- [7] J. M. Goodkind, Rev. Sci. Instrum. **70**, 4131 (1999)
- [8] M. de Angelis et al., Meas. Sci. Technol. **20**, 022001 (2009)

## KURZGEFASST

### ■ Neue Elemente benannt

Die International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) hat Namen für vier neu entdeckte Elemente vorgestellt. Demnach soll Element 113 nach dem japanischen Namen für Japan Nihonium (Nh) heißen, Element 115 Moscovium (Mc) nach Moskau, Element 117 Tennessine (Ts) nach dem US-amerikanischen Staat Tennessee und Element 118 Oganesson (Og) nach dem theoretischen Kernphysiker Yuri Oganessian. Fünf Monate lang besteht nun die Möglichkeit, diese Namen zu kommentieren, bis sie als akzeptiert gelten und veröffentlicht werden.

P. J. Karol et al., Pure & Appl. Chem. **88**, 139 & 155 (2016); W. H. Koppenol et al., Pure & Appl. Chem. **88**, 401 (2016)

### ■ Zweigeteilte Schrödinger-Katze?

Die berühmte Schrödinger-Katze ist tot und lebendig bis zu dem Zeitpunkt, an dem man nachschaut. Forscher der Yale University haben nun gewissermaßen eine lebendig-tote Schrödinger-Katze erzeugt, die an zwei Orten gleichzeitig war. Dazu verschränkten sie zwei extrem nichtklassische Mikrowellenfelder miteinander, die jeweils in einem Schrödinger-Katzenzustand waren und sich in zwei unterschiedlichen Hohlraumresonatoren befanden. Mit diesem Experiment hat die Kontrolle von Quantenzuständen eine Stufe erreicht, die neue Möglichkeiten für die Quanteninformationsverarbeitung eröffnet.

C. Wang et al., Science **352**, 1087 (2016)