

Schwere Experimente

Bis heute bringt die präzise Messung der Gravitationskonstanten Experimentatoren an ihre Grenzen.

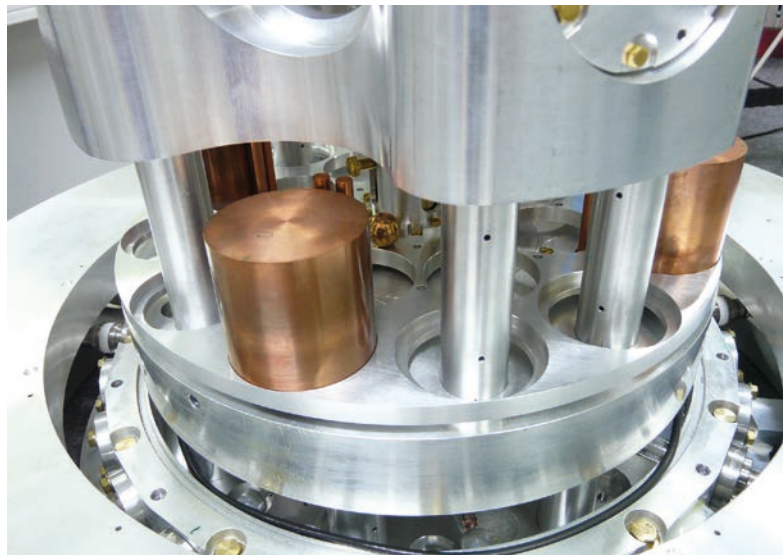
Christian Rothleitner und Stephan Schlamminger

Obwohl die Gravitationskonstante eine der ersten Fundamentalkonstanten ist, die je gemessen wurde, ist sie immer noch die am ungenauesten bestimmte. In den letzten fünf Jahren hat sich die relative Standardmessunsicherheit nur etwa um den Faktor zwei verringert. Im Juni 2015 hat das Committee on Data for Science and Technology (CODATA) eine neue Empfehlung für den Wert der Newtonschen Gravitationskonstanten herausgegeben – gegenwärtig mit einer relativen Unsicherheit von $4,7 \times 10^{-5}$. Neue Wege sind nötig, um diese Unsicherheit zu verkleinern.

Nach Isaac Newton ist die Anziehungskraft zwischen zwei punktförmigen Massen m_1 und m_2 im Abstand r gegeben durch $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$. Der in dieser Gleichung auftretende Faktor G bezeichnet die Gravitationskonstante und gilt als Fundamentalkonstante, d. h. sie besitzt einen Wert, der im gesamten Universum gleich ist und sich zeitlich nicht ändert.

Genau genommen taucht G in Newtons Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica von 1687 [1] – kurz Principia – nicht einmal auf. So bleibt in jenem Meisterwerk, das die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern beschreibt, das Maß für die Stärke der beschreibenden Kraft unerwähnt. Aus damaliger Sicht betrachtet verwundert diese Tatsache aber nicht so sehr: Zu Newtons Zeit war die Gravitationskonstante nicht interessant. Die Massen der Himmelskörper waren einfach zu ungenau bekannt, und es gab keine hinreichend präzise Technologie, um Kräfte zwischen zwei Massen im Labor zu messen. Die Wissenschaft interessierte sich vielmehr für astronomische oder geophysikalische Fragen wie die Dichte der Erde. Diese hatte Newton auf 5000 bis 6000 kg m^{-3} geschätzt und damit den heutigen Messwert von $\rho_e = 5514 \text{ kg m}^{-3}$ gut getroffen. Seine Schätzung basierte auf einer Extrapolation der Dichte von Objekten auf der Erdoberfläche wie Wasser, Erde und Gestein.

Bei den meisten Ableitungen in den Principia handelt es sich um Verhältnisgleichungen, was für diese Zeit üblich war. Wahrscheinlich führte Siméon Denis Poisson die Konstante erst 1811 ein. König und Richarz haben 1885 das noch heute übliche Symbol G – häufig „groß G “ genannt – verwendet. Sie prägten zudem den Ausdruck Gravitationskonstante. Einen vergleichbaren Stellenwert nahm die mittlere Dichte der Erde ρ_e ein. Hat man diese bestimmt, lässt sich unter der



T. J. Quinn

Diese moderne Torsionswaage am Bureau International des Poids et Mesures dient zur Messung der Gravitationskonstanten G . Anfang 2016 wird sie am NIST

wieder aufgebaut. Dort wird eine unabhängige Gruppe mit derselben Apparatur eine zweite Messung durchführen.

Annahme einer kugelförmigen Erde mit Radius r_e die Gravitationskonstante aus

$$G = \frac{3g}{4\pi} r_e^{-1} \rho_e^{-1}$$

errechnen. Dabei ist g die lokale Fallbeschleunigung („klein g “). Der Radius der Erde war damals bekannt, g messbar. Im Umkehrschluss folgt mithilfe von G aus der obigen Gleichung die mittlere Dichte der Erde.

Ein erstes Experiment, um die Dichte der Erde über die Gravitationskraft zu messen, leitete Maskelyne 1776. Er maß die Lotabweichung neben dem Mount Schie-

KOMPAKT

- In seinen Principia beschreibt Newton zwar die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern, nicht aber die Gravitationskonstante. Diese führte Poisson 1811 ein.
- Henry Cavendish führte 1798 das erste Experiment zur Messung der Gravitationskonstanten durch. Die Torsionswaage ist bis heute eines der Standardmessinstrumente für G . Andere Experimente nutzen z. B. Massekomparatoren oder Freifall-Gravimeter.
- Das CODATA sammelt Messwerte für Fundamentalkonstanten aus Veröffentlichungen und empfiehlt auf dieser Basis einen internationalen Standardwert. Für G ist dies: $G = (6,67408 \pm 0,00031) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Dr. Christian Rothleitner, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig; Dr. Stephan Schlamminger, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899-8171, USA

hallion in Schottland und bestimmte die Richtung des Lots mithilfe der Fixsterne. Damit kam er auf ein Ergebnis von $\rho_e = 4500 \text{ kg m}^{-3}$. Die Resultate weiterer Messungen dieser Art waren alle im Wesentlichen zu niedrig. Heute ist bekannt, dass unter Bergen in der Regel Regionen mit niedrigerer Dichte liegen, was den zu geringen Wert für ρ_e erklärt. Hier zeigt sich ein typisches Problem bei der Bestimmung von G : Das Dichteprofil der verwendeten Massen muss sehr genau bekannt sein.

Die erste Messung im Labor veröffentlichte Henry Cavendish 1798 [2, 3]. Er benutzte eine Torsionswaage, die er von seinem Freund John Michell erbt. Damit maß er die mittlere Dichte der Erde relativ zur Dichte von Wasser. Hierzu war es nicht nötig, G zu kennen, sondern die Verhältnisgleichung aus Newtons Principia genügte. Cavendishs berühmtes Experiment hat die Messungen für die nächsten zweihundert Jahre nachhaltig beeinflusst. Der Aufbau ist elegant, simpel und ein Meilenstein der Experimentalphysik.

Der Vergleich von Cavendishs Messtechnik mit heutigen Methoden (Abb. 1) zeigt deutlich, wie tief das historische Experiment das Fachgebiet beeinflusst hat. Zum Beispiel modulieren alle heutigen Experimente die Position der Feldmassen, um G zu bestimmen. Bis vor wenigen Jahren war die hantelförmige Testmasse, inspiriert von Cavendishs Messaufbau, das gemeinsame Element aller Torsionswaagenexperimente. Jens Gundlach konnte aber 1998 zeigen, dass sich eine dünne Platte als Geometrie wesentlich besser eignet [4]. In diesem Fall lassen sich nämlich das gravitative Drehmoment und das Trägheitsmoment mit einer ähnlichen Formel berechnen und im Idealfall sogar herauskürzen. In Cavendishs Arbeit findet sich eine weitere interessante Beobachtung: Er beschreibt, wie die Torsionswaage in eine neue Gleichgewichtslage

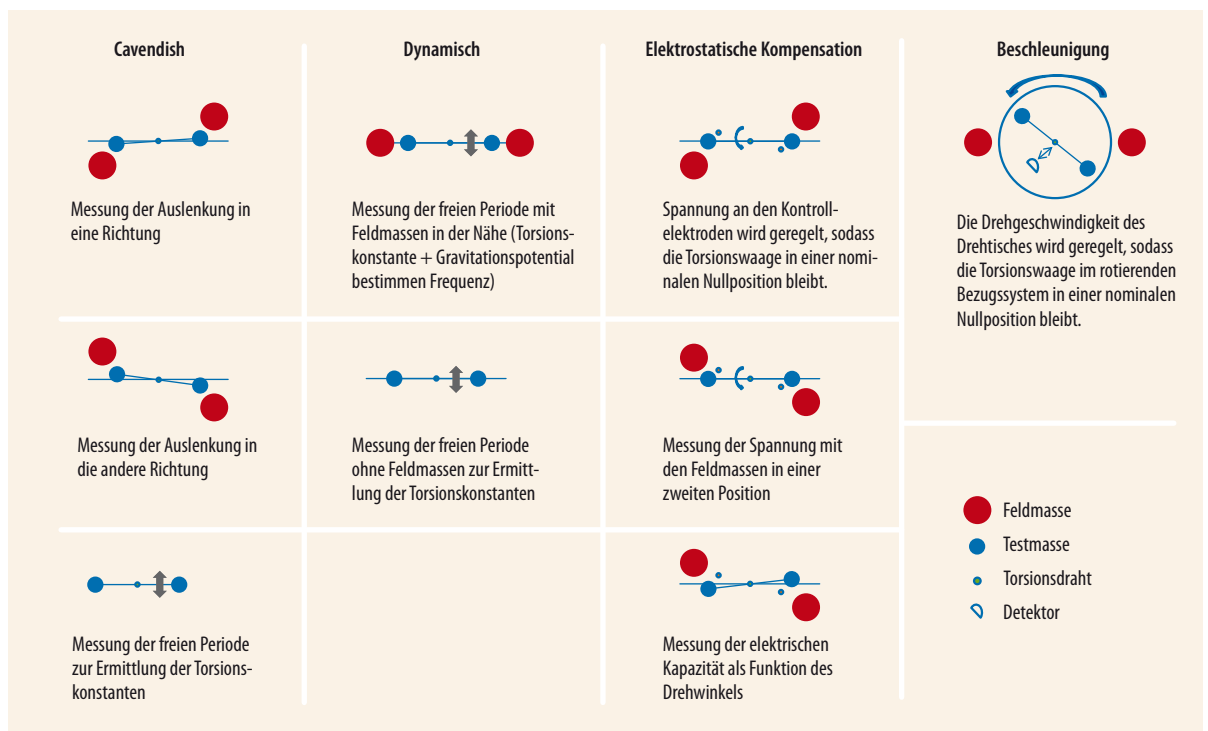
schwingt, nachdem er die Position der Feldmasse verändert hatte. Die Torsionswaage „kriecht“ langsam in die neue Gleichgewichtslage – dieser Vorgang dauert bis zu einer Stunde. Die Torsionswaage verhält sich, als würde die Gravitationskraft langsam ansteigen. Kazuaki Kuroda hat dieses Verhalten 1995 erklärt und damit einen systematischen Effekt beschrieben, der fast 200 Jahre lang nahezu jedes Experiment mit Torsionswaagen beeinflusst hatte: die Anelastizität [5]. Sie sorgt dafür, dass die Federkonstante von der Frequenz abhängt. Vor Kurodas Veröffentlichung wurde fälschlicherweise angenommen, dass dem nicht so ist. Diese Fehlannahme führte zu einem Wert für G , der größer ist als der tatsächliche. Der Messfehler ist dabei indirekt proportional zum Gütefaktor des Torsionsoszillators.

Motivation für Präzision

Cavendish hatte kein Interesse daran, die Gravitationskonstante zu messen. Denn um die Dichte der Erde zu bestimmen, ist es nicht nötig, G zu kennen. Was ist also die Motivation dafür, die Gravitationskonstante immer genauer kennen zu wollen? Für einen Metrologen ist es in erster Linie natürlich die enorme Herausforderung einer präzisen Messung von G an sich. Sie ist schließlich eine Fundamentalkonstante und sollte daher so genau wie möglich bekannt sein. Wenn Schwierigkeiten bei der Messung auftreten, deutet das vielleicht darauf hin, dass die Gravitation ungenügend verstanden ist.

Während es schwierig ist, die Gravitationskonstante zu messen, lässt sich die geozentrische Gravitationskonstante, also das Produkt von Erdmasse und G , durch Messungen von Satellitenbahnen mit einer relativen Standard-Messunsicherheit von 2×10^{-9} bestim-

Abb. 1 Vier verschiedene Arten einer Torsionswaage dienen dazu, die Gravitationskonstante zu bestimmen. Die Methode rechts nutzten Gundlach und Merkowitz [4] für die bislang genaueste aller Messungen.



men. Unsere Kenntnis der Erdmasse und mit ähnlicher Argumentation der Sonnenmasse ist folglich begrenzt durch unsere Kenntnis von G . Für die Geodäsie und Geophysik ist G aber noch von weiterem Interesse. Die Elastizitätsparameter der Erde – die so genannten Loveschen Zahlen – geben Aufschluss darüber, in welchem Maße sich die Erde durch den Einfluss der Gezeiten verformt und hängen von G ab.

Gradiometer, also Geräte, die den Gradienten des Erdschwerefeldes messen, spielen eine wichtige Rolle, um Bodenschätze aufzufinden oder Inertial-Navigationsgeräte, z. B. in U-Booten, zu korrigieren. Auch könnten sie dazu dienen, Schiffscontainer zu inspizieren. Dabei messen die Gradiometer die Dichteverteilung innerhalb des Containers. Sie sollen dabei alternativ zu elektromagnetischen oder Röntgensensoren helfen, gefährliches Material (z. B. Uran) aufzuspüren [6]. Die Kalibrierung der Gradiometer ist allerdings limitiert, da es hierfür erforderlich ist, die Gravitationskraft des Kalibriernormals zu kennen. Eine gute Motivation, G besser zu messen.

Immer die Torsionswaage?

Über 200 Jahre sind seit Cavendishs bekannter Messung vergangen. Er erzielte damals eine relative Standard-Messunsicherheit von $7,4 \times 10^{-3}$. Die bis heute genaueste Messung von G gelang Gundlach und Merkowitz 2000 [4]. Sie geben eine relative Standard-Messunsicherheit von $1,4 \times 10^{-5}$ an – das entspricht einer Verringerung der Messunsicherheit um einen Faktor von gerade einmal 500 in 200 Jahren (Tabelle 1). Zum Vergleich: Die Stabilität von Uhren verbesserte sich in den letzten fünfzig Jahren um neun Größenordnungen.

Seit Cavendish ist die Torsionswaage das beliebteste Instrument, um die Gravitationskonstante zu messen. In den letzten 30 Jahren beruhen neun von dreizehn Messungen auf diesem Prinzip (Abb. 2). Das hat mehrere Gründe: Zum Einen misst die Torsionswaage lotrecht zu g und unterdrückt somit die Gravitation der Erde. Das erlaubt eine Messung über lange Zeit, ohne den Einfluss der Erdbeschleunigung. Auch sind die Torsionskonstanten der verwendeten dünnen Wolframdrähte sehr klein; entsprechend groß sind die Auslenkungen. Nicht zuletzt beschreibt die Torsionswaage ein einfaches physikalisches System, im Idealfall das eines eindimensionalen harmonischen Oszillators.

Geschätzte 70 Prozent aller mehr als 300 bis heute durchgeführten Bestimmungen von G beruhen auf der Torsionswaage [7]. Trotzdem gab es andere Ansätze: An der Universität Zürich beispielsweise nutzte eine Gruppe um Walter Kündig von 1994 bis 2006 einen modifizierten kommerziellen Massekomparator (Abb. 3). Dieser diente dazu, den Gewichtsunterschied zwischen zwei vertikal separierten Testmassen zu messen. Der Gewichtsunterschied wurde mit 13,6 Tonnen Quecksilber moduliert. In einem Zustand befand sich das Quecksilber zwischen beiden Testmassen, im an-

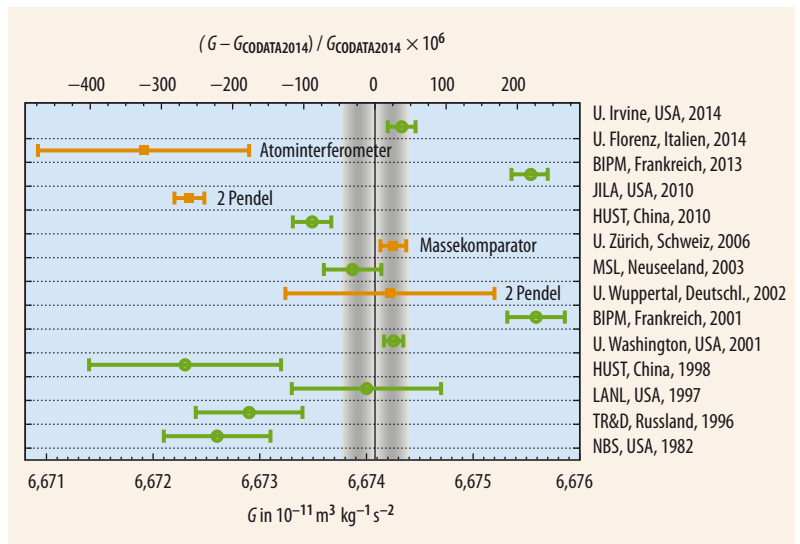


Abb. 2 Die Messungen der letzten drei- bis vier Jahre schwanken um den empfohlenen Wert für G . Nur vier (orange) der dreizehn Experimente basieren nicht auf dem Prinzip der Torsionswaage (grün). Der vertikale graue Balken zeigt den CODATA 2014-Wert mit seiner zugehörigen Standard-Messunsicherheit.

deren außerhalb beider Testmassen (eine Hälfte unter der unteren, die andere oberhalb der oberen). Die Differenz der Gewichtsunterschiede in beiden Zuständen betrug etwa 800 Mikrogramm. Aus dieser Differenz, der gemessenen lokalen Fallbeschleunigung g und der bekannten Massenverteilung lässt sich auf G schließen. So konnte die Züricher Gruppe die Gravitationskonstante mit einer relativen Standard-Messunsicherheit von $1,8 \times 10^{-5}$ angeben [8].

Jim Faller, ein Pionier in der Entwicklung von Freifall-Absolutgravimetern, wählte 1998 einen anderen Ansatz. Er maß den Einfluss einer Feldmasse auf die lokale Fallbeschleunigung, die er mit Hilfe von Absolutgravimetern bestimmte (Abb. 4a). Dabei fällt eine Testmasse, die einen Retroreflektor enthält, frei im Vakuum. Ein Laserinterferometer dient dazu, die Position der Testmasse als Funktion der Zeit zu bestimmen. Aus der resultierenden Wurfparabel leitet sich die Fallbeschleunigung g ab. Die Gruppe um Faller positionierte nun abwechselnd oberhalb und unterhalb der frei fallenden Testmasse eine Feldmasse von 500 kg. Ähnlich zum Züricher Experiment verringert bzw. erhöht sich die Fallbeschleunigung auf den Testkörper je nach Position der Feldmasse. Diese Modulation eliminiert die Erdbeschleunigung, sodass sich der Einfluss der Feldmasse erfassen lässt. Die relative Standard-Messunsicherheit war dabei mit $1,4 \times 10^{-3}$ [9] zwar relativ groß, aber es war eine schöne Hommage an Newtons Legende vom fallenden Apfel.

Während das Freifallgravimeter von Faller einen Retroreflektor als Testmasse besitzt, der den Objekt-

Jahr	Gruppe	Messprinzip	G in $10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	$(\sigma G/G)$ in 10^{-6}
1798	Henry Cavendish	Torsionswaage	$6,75 \pm 0,05$	7410
1895	C. V. Boys	Torsionswaage	$6,658 \pm 0,007$	1051
1982	Luther & Towler	Torsionswaage	$6,6726 \pm 0,0005$	75
2000	Gundlach & Merkowitz	Torsionswaage	$6,674255 \pm 0,000092$	14

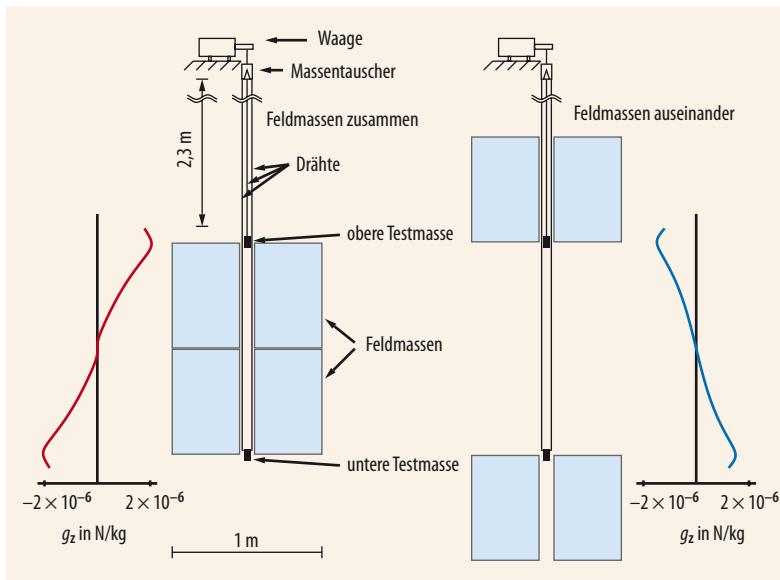


Abb. 3 Beim Züricher Experiment enthalten die Feldmassen jeweils 6,8 Tonnen reines Quecksilber. Die Testmassen (etwa 1 kg) hängen an Drähten, die sich über einen Massentauscher abwechselnd an den Massekomparator anbringen lassen. Durch die zusätzliche, von den Feldmassen erzeugte, lokale Gravitationsfeldstärke (in den Graphen links und rechts angedeutet) ändert sich die Gewichtskraft der Testmassen. Dieser Unterschied dient zur Berechnung von G .

spiegel in einem Laserinterferometer darstellt, gibt es seit einigen Jahren auch Atomgravimeter [10]. Hierbei sind drei Lichtpulse ($\pi/2$, π und $\pi/2$) erforderlich. Der erste $\pi/2$ -Lichtpuls fungiert als Strahlteiler, der die Wellenfunktion eines Atoms in eine Superposition von zwei Zuständen präpariert. Der eine Zustand besitzt einen höheren vertikalen Impuls als der andere. Nach einer Zeit T folgt der π -Puls, der die beiden Wellenfunktionen und die Impulse vertauscht. Der letzte $\pi/2$ -Lichtpuls bringt zum Zeitpunkt $2T$ die Wellenfunktion in einen der beiden Quantenzustände. Die Wahrscheinlichkeit, die Atome in einem der beiden Zustände zu finden, oszilliert mit einem Phasenwinkel, der proportional zum Produkt der lokalen Fallbeschleunigung und der anfänglichen Impulsdifferenz der beiden Quantenzustände ist. Die Messgröße ist also der relative Teil der Atome in einem Zustand. Daraus lässt sich die Fallbeschleunigung ermitteln.

Solche Atomgravimeter erlauben Messungen der Gravitationskonstanten. Ein ähnliches Experiment führte die Gruppe von Guglielmo Tino an der Universität Florenz im letzten Jahr durch [11]. Ein wichtiger Unterschied ist jedoch, dass die Physiker dort gleichzeitig zwei Atomwolken fallen ließen, die vertikal separiert waren, aber entlang derselben Lotsenkrechten fielen (Abb. 4b). Gemessen wird somit der Unterschied der Fallbeschleunigungen auf beide Wolken, denn diese ändert sich ja mit dem Abstand zum Erdschwerpunkt. Dies wiederum stellt ein Gradiometer dar. Der enorme Vorteil ist, dass sich durch die differentielle Messung viele Unsicherheitsfaktoren herausheben – so wird nicht g direkt bestimmt, sondern der Gradient der Fallbeschleunigung und der Einfluss der Feldmassen. Um diesen Gradienten zu eliminieren, musste man allerdings wieder die Feldmassen modulieren – die relative Standard-Messunsicherheit betrug $1,5 \times 10^{-4}$.

Einen Schritt weiter gehen Christian Rothleitner und Olivier Francis von der Universität Luxemburg, die vorschlagen, drei Körper gleichzeitig fallen zu lassen und ihre differentielle Fallbeschleunigung zu messen [12]. Diese Körper fallen, wie bei Tino, entlang

derselben Lotsenkrechten, aber räumlich in gleichen Abständen separiert. Gemessen wird einerseits die differentielle Fallbeschleunigung zwischen oberer und mittlerer Testmasse, andererseits die zwischen mittlerer und unterer Testmasse, sodass sich zwei Gradientenwerte ergeben. Für die Messung kann der Gradient des Erdschwerefeldes mit hinreichender Genauigkeit als konstant gelten. Betrachtet man nun die Differenz beider Messungen, hebt sich neben g auch der Gradient heraus. Im Prinzip ist dies ein Nullinstrument, das sehr sensibel auf Änderungen im lokalen Gravitationsfeld reagiert. Die Schwerebeschleunigung einer lokalen Feldmasse lässt sich somit genau und ohne Umwege, d. h. ohne Neupositionierung, bestimmen.

Experimente an ihren Grenzen

Die neue CODATA-Empfehlung für G hat nur noch die halbe Messunsicherheit der Empfehlung von 2010. Verglichen mit anderen Naturkonstanten ist die Gravitationskonstante mit einer relativen Messunsicherheit von $4,7 \times 10^{-5}$ allerdings nur sehr schlecht bekannt. Zum Beispiel ist das Plancksche Wirkungsquantum h , das ebenfalls mit mechanischen Apparaturen gemessen wird, mit einer relativen Messunsicherheit von $1,2 \times 10^{-8}$ – also um den Faktor 4000 genauer – bestimmt. Gerade in den letzten 30 Jahren gab es etwas mehr als ein Dutzend hochpräziser Messungen der Gravitationskonstanten (Abb. 2), die relativen Unsicherheiten kleiner als $1,5 \times 10^{-4}$ angeben. Jedoch weichen ihre Messwerte um ein Vielfaches der abgeschätzten Standard-Messunsicherheiten voneinander ab. Dies hat zur Folge, dass der CODATA-Ausgleichswert weniger genau bekannt ist. Die relative Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Wert beträgt 6×10^{-4} , was etwa 13-mal größer ist als die Unsicherheit des empfohlenen Wertes. Dies legt die Vermutung nahe, dass bei verschiedenen Experimenten ein systematischer Fehler übersehen wurde.

Diese große Streuung bereitet den Metrologen Kopfzerbrechen. So ist nicht zu erwarten, dass weitere Experimente einzelner Gruppen dieses Dilemma lösen können. 2014 gab es deshalb zwei Tagungen zum Thema, auf denen die Metrologen das weitere Vorgehen diskutiert haben – eine erste unter der Schirmherrschaft der britischen Royal Society [13] im Februar und eine weitere unter der Leitung des amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) im Oktober. Fast alle *G*-Experimentatoren der letzten Jahrzehnte waren anwesend. Ein Vorschlag auf den Tagungen war, ein internationales Konsortium zu bilden, um ein gemeinsames Experiment zur Messung der Gravitationskonstanten aufzubauen und durchzuführen. Da nationale Metrologie-Institute wie die deutsche Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) oder das amerikanische NIST hervorragend ausgestattet sind, um die gemessenen Größen direkt rückzuführen, liegt es nahe, ein solches Vorhaben dort durchzuführen [14]. Die Zukunft wird zeigen, welche Institute sich der Aufgabe stellen, eine international abgestimmte Messung der Gravitationskonstanten anzugehen.

Als weiteres Resultat ging aus diesen Tagungen eine Arbeitsgruppe für *G* im Rahmen der International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) hervor. Künftig wird es möglich sein, diese Arbeitsgruppe bei Experimenten beratend hinzuzuziehen. Sie schafft eine Plattform zum Meinungsaustausch über technische Details verschiedener Experimente. Weitere Tagungen sollen regelmäßig stattfinden, um die aktuelle Lage einzuordnen und das weitere Vorgehen zu beraten.

Die Größe von *G* zu bestimmen treibt die Experten an die Grenzen ihrer Möglichkeiten, da hierbei viele Faktoren aufeinander treffen:

- Der absolute Zahlenwert von *G* ist unglaublich klein – vierzig Größenordnungen im Vergleich zur elektrostatischen Kraft,
- Störende Gravitationsfelder lassen sich nicht abschirmen – es gibt keinen Faradayschen Käfig für Gravitation,
- Torsionswaagenexperimente sind extrem langsam, gerade weil die Kräfte sehr klein sind und die Messung mechanisch erfolgt.

Wie klein sie sind, zeigt sich deutlich, wenn man Einheitswerte in Newtons Gravitationsgleichung einsetzt. Für zwei Punktmassen von einem Kilogramm im Abstand von einem Meter beträgt nämlich die Anziehungskraft nur 67×10^{-12} N. Das entspricht etwa einem Viertel der Gewichtskraft eines roten Blutkörperchens. Um diese kleine Kraft sehr genau zu messen, ist ein extrem empfindliches Messgerät erforderlich.

G wie genau?

Die Zukunft dieser schwierigen Messung sieht jedoch vielversprechend aus. Neue Technologien wie die Atominterferometrie erlauben Messungen, bei denen die Testmassen (Atome) keine mechanische Verbindung zur Apparatur haben. Markus Aspelmeyer von

der Universität Wien arbeitet derzeit an einem Experiment mit dem Ziel, mithilfe der Quantenoptomechanik die Gravitationskraft zwischen zwei Millimeter großen Kugeln zu messen. Hauptvorteil gegenüber einer Torsionswaage ist hierbei – neben der geringen Größe des Aufbaus – die wesentlich höhere Frequenz von rund 100 Hz, mit der das mechanische System schwingt. Dies erlaubt eine kürzere Messzeit bzw. eine bessere Messstatistik.

Auch bei den klassischen Experimenten gibt es interessante Entwicklungen. Zwei Experimente finden zurzeit an der Huazhong Universität in Wuhan, China, statt und könnten spannende Ergebnisse liefern. Ein Aufbau, der in den letzten Jahren am Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Paris zur Messung von *G* diente, wird Anfang nächsten Jahres ans NIST geschickt. Dort wird die Apparatur neu aufgebaut und für eine unabhängige Messung verwendet. Am BIPM lieferte dieses Experiment einen Messwert, der einige Standardabweichungen über dem Literaturwert liegt (Abb. 1). Eine zweite Messung mit derselben Apparatur in einem unabhängigen Labor ist daher hochinteressant. Ein Erkenntnisgewinn wird sich unabhängig vom Resultat der zweiten Messung einstellen. Stimmen beide Messungen überein, erhöht das beträchtlich das Vertrauen in das Resultat. Stimmen sie nicht überein, kann man jedes Untersystem genau untersuchen und eventuell einen bisher übersehenen systematischen Fehler entdecken.

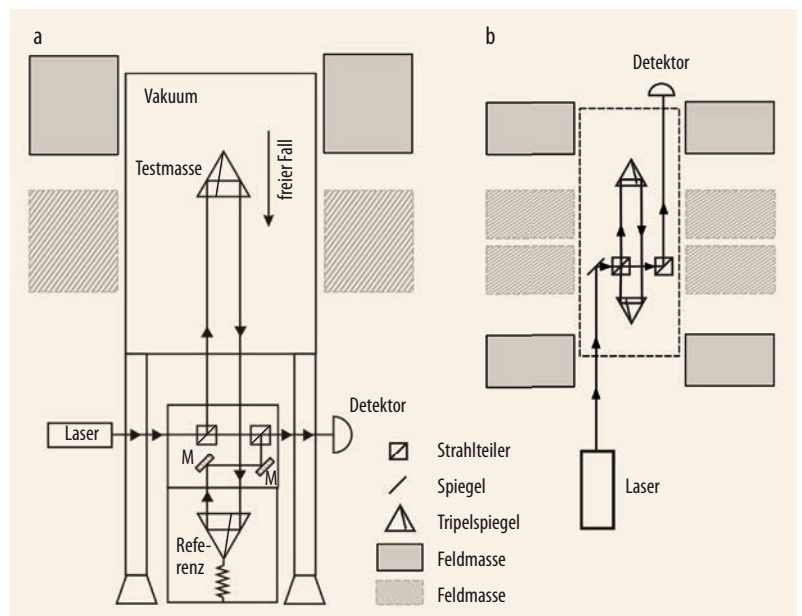


Abb. 4 In einem Freifall-Absolutgravimeter (a) wird eine Testmasse, die einen Retroreflektor enthält, im Vakuum fallen gelassen und ihre Positionsänderung mithilfe eines Laserinterferometers gemessen. Der Referenz-Retroreflektor ist gegen seismische Schwingungen isoliert. Bringt man Feldmassen an verschiedenen Positionen an, verändert sich die lokale Fallbeschleunigung. Aus der Größe dieser Änderung leitet sich die Gravitationskonstante ab. Fallen

beide Retroreflektoren gleichzeitig (b), während die anderen Komponenten des Interferometers mit dem Gehäuse verbunden sind, lässt sich der lokale Schweregradient bestimmen, nicht aber die absolute Fallbeschleunigung. Durch Anbringen von Feldmassen ändert sich der lokale Schweregradient, sodass man *G* ermitteln kann. Die Gruppe in Florenz nutzte einen ähnlichen Aufbau mit gekühlten Atomwolken als Fallkörper.

Die amerikanische Science Foundation (NSF) plant im Sommer 2016 ein Ideenlabor über die Messung von G . Aus dieser Veranstaltung könnten neue Ansätze für die Messung der Gravitationskonstanten hervorgehen, die das Gebiet hoffentlich ein großes Stück voranbringen werden. Gegenwärtig lässt sich die Situation am besten mit einem alten chinesischen Sprichwort zusammenfassen: „Ob wir es wollen oder nicht – wir leben in interessanten Zeiten“.

Literatur

- [1] *S. I. Newton*, Newton's Principia – The Mathematical Principles of Natural Philosophy, <http://cudl.lib.cam.ac.uk/view/PR-ADV-B-00039-00001/1>
- [2] *H. Cavendish*, Philos. Trans. Roy. Soc. London **88**, 469 (1798)
- [3] *S. Ducheyne*, Science & Education **21**, 87 (2012)
- [4] *J. H. Gundlach* und *S. M. Merkowitz*, Phys. Rev. Lett. **85**, 2869 (2000)
- [5] *K. Kuroda*, Phys. Rev. Lett. **75**, 2796 (1995)
- [6] *B. Kirkendall*, *Y. Li* und *D. Oldenburg*, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on **45**, 1786 (2007)
- [7] *G. T. Gillies*, Metrologia **24**, 1 (1987)
- [8] *S. Schlamminger* et al., Phys. Rev. D **74**, 082001 (2006)
- [9] *J. P. Schwarz* et al., Science **282**, 2230 (1998)
- [10] *M. Kasevich* und *S. Chu*, Phys. Rev. Lett. **67**, 181 (1991)
- [11] *G. Rosi* et al., Nature **510**, 518 (2014)
- [12] *C. Rothleitner* und *O. Francis*, Review of Scientific Instruments **85**, 044501 (2014)
- [13] *T. Quinn* und *C. Speake*, Philosophical transactions Series A **372**, 2026 (2014)
- [14] *T. Quinn*, Nature **505**, 455 (2014)

DIE AUTOREN

Christian Rothleitner studierte Physik in Erlangen und promovierte über Freifall-Absolutgravimeter in der Max-Planck-Forschungsgruppe (heutiges MPI für die Physik des Lichts) in Erlangen. Als Postdoc entwickelte er an der U Luxemburg ein Freifall-Gradiometer zur Messung der Gravitationskonstante. Seit 2013 arbeitet er in der PTB im Fachbereich Koordinatenmesstechnik.



Stephan Schlamminger (FV Gravitation und Relativität) hat nach seinem Physikstudium in Regensburg an der Universität Zürich promoviert. Während seiner Postdoc-Zeit an der University of Washington in Seattle hat er sich mit einem experimentellen Test des Äquivalenzprinzips beschäftigt. Zurzeit arbeitet er am NIST in Gaithersburg (USA) an einem Experiment zur Messung der Planck-Konstante mit einer Wattwaage. Mit Hilfe dieses Experiments soll künftig die Einheit der Masse, das Kilogramm, realisiert werden.

