Messungen der Gravitationskonstanten

Schwierige Bestimmung einer fundamentalen Naturkonstanten

G. Wolschin[1]

Von allen Naturkonstanten hat die Gravitationskonstante nach der Lichtgeschwindigkeit die am weitesten zurückreichende Mess-Historie. Dennoch ist sie heute nur auf 0,15 Prozent genau bekannt - schlechter als bei der Festlegung durch das CODATA-Komittee 1986. Ursache des Problems ist einerseits die sehr schwache Gravitationswechselwirkung, andererseits sind es stark divergierende Messungen durch verschiedene Gruppen. Im Artikel werden die wichtigsten Messungen seit 1982 vorgestellt, und neue Hochpräzions-Experimente diskutiert. Am aussichtsreichsten ist derzeit ein Versuch an der Universität von Washington mit einer im Hochvakuum rotierenden Torsionswaage. Hier liess sich die Messunsicherheit auf 14 ppm reduzieren.

[1] **Anschrift des Verfassers:** *Georg Wolschin*, Universität Heidelberg, 69120 Heidelberg.
Email: wolschin@uni-hd.de http://wolschin.uni-hd.de

1 Einleitung

Als *Issac Newton* bei der Formulierung seiner drei grundlegenden Gesetze im Rahmen der *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* in den Jahren 1684 bis 86 erkannte, dass die Planeten auf ihren Keplerbahnen um die Sonne dem gleichen Kraftgesetz genügen müssen wie die Jupitermonde und auch der Erdmond auf ihren jeweiligen Umlaufbahnen, war das Konzept der universellen Schwerkraft geboren. *Newton* verwandte dafür das lateinische Wort *Gravitas*. Er fand das universelle Gravitations-Gesetz auch anhand anderer Phänomene wie Ebbe und Flut, oder den Kometenbahnen bestätigt. Es sagt aus, dass die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern proportional zum Produkt ihrer Massen M, m und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes r der Massenzentren ist

$$F(r) = G\frac{mM}{r^2}. \tag{1}$$

Die Proportionalitätskonstante G bestimmt die Stärke der Gravitationskraft, der schwächsten der vier heute bekannten Grundkräfte. Unter den fundamentalen Naturkonstanten spielt sie eine herausragende Rolle. Das hat sich auch durch *Einsteins* allgemeine Relativitätstheorie nicht geändert, in der die Materieverteilung die Raum-Zeit-Krümmung bestimmt: Diese Theorie schliesst sich nahtlos an die newtonsche an [1] und hat in der terrestrischen Physik und im Planetensystem nur minimale Korrekturen zur Folge. Am Zahlenwert von G ändert sich durch sie gar nichts, vielmehr ist die Naturkonstante κ in den *Einsteinschen* Feldgleichungen mit G in eindeutiger Weise verknüpft über die Relation

$$\kappa = 8\pi G/c^4 \tag{2}$$

mit der Lichtgeschwindigkeit c. Obgleich die Gravitationsanziehung (nach *Newton*) beziehungsweise die Raumkrümmung (nach *Einstein*) das kosmische Geschehen dominiert, ist sie bei den Objekten unserer Alltagserfahrung so gering, dass *Newton* G zwar abschätzen konnte, es aber für unmöglich hielt, die genaue Größe dieser Naturkonstanten im Labor zu bestimmen.

Dennoch gelang 100 Jahre später *Henry Cavendish* ein derartiges Experiment mit einer Torsionswaage. Bis heute konnte die Genauigkeit seiner Messung nur um zwei Größenordnungen verbessert werden - das entspricht einem Faktor 10 pro Jahrhundert. Schon die fünfte Stelle von G ist noch nicht gesichert: Der von *Gabriel Luther* und *William Towler* 1982 gemessene [2], 1986 vom internationalen CODATA-Komitee offiziell anerkannte [3] Wert

$$G = 6,67259(85)10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2} \tag{3}$$

hatte eine Unsicherheit von $\pm 0,00085$ entsprechend 128 Millionstel (ppm). Andere fundamentale Naturkonstanten wie die Elektronenladung (heutige Messunsicherheit 39 Milliardstel) und die Feinstrukturkonstante (Messunsicherheit 3,6 Milliardstel) sind dagegen mit weitaus höherer Präzision bekannt. Mehrere Forschergruppen arbeiten deshalb heute intensiv daran, diese unbefriedigende Situation zu ändern. Diese Notiz soll einen kurzen Überblick über wichtige Abschnitte in der neueren Geschichte der Messungen von G geben, und den heutigen Forschungsstand schildern.

Einen theoretischen Vergleichswert für die Gravitationskonstante gibt es dabei nicht. Vielleicht lässt sich eines Tages aus einer vereinigten Theorie aller vier Grundkräfte der Wert von G berechnen - heute jedoch sind die Physiker noch weit davon entfernt. Superstring-Theorien enthalten zwar prinzipiell sowohl Gravitation als auch Quantentheorie und ermöglichen grobe Abschätzungen von G; ihre Genauigkeit bleibt aber noch weit hinter der experimentell erreichbaren zurck.

2 Mess-Prinzipien

Da die Gravitationskraft nicht nur sehr klein ist, sondern sich - anders als die elektromagnetische Anziehung - auch nicht abschirmen lässt, sind die Messungen extrem schwierig. Die Geräte müssen äusserst leicht ansprechen und reagieren entsprechend empfindlich auf Temperaturänderungen und Vibrationen. Selbst kleinste Variationen der Massenverteilung in der Umgebung des Experiments müssen ausgeschaltet werden; beispielsweise hat die regelmäßige Bewässerung einer benachbarten Rasenfläche 1978 das Ergebnis eines

Experiments an der Universität von Kalifornien in Irvine verfälscht [4]. Wenn schließlich die Gravitationskraft gemessen ist, muss daraus G berechnet werden - was die genaue Kenntnis der relevanten Massenverteilung voraussetzt und deshalb keineswegs einfach ist.

Den 1986 von CODATA zunächst zur Verwendung empfohlenen Wert von G hatten die amerikanischen Physiker *Luther* und *Towler* 1982 mit einer im Prinzip ähnlichen Anordnung wie *Cavendish* bestimmt. Sie benutzten eine kleine rotierende Hantel an einem Wolframfaden, deren Drehrichtung sich - wegen der Steifigkeit des Fadens - alle sechs Minuten umkehrte. Wurden zwei große Wolframkugeln in die Nähe der Hantel gebracht, verlangsamte sich deren Rotation als Folge der Gravitationsanziehung um Sekundenbruchteile. Der resultierende Wert von G erwies sich als sehr genau: Die Messunsicherheit betrug nur 0,01 Prozent.

Präzise Drehwaagen waren früher insbesondere Ende des 19. Jahrhunderts von *Roland Eötvös* und seinen Kollegen konstruiert worden, um Gradienten der Schwerkraft zu bestimmen und die Äquivalenz von träger und schwerer Masse auf seinerzeit $0,5 \times 10^{-8}$ genau zu testen. Das in Abb.1 im Querschnitt gezeigte historische Gerät beispielsweise zeigt einen dünnen Stab, der an einem Torsionsfaden aufgehängt ist, und an dessen Ende Testmassen aus unterschiedlichen Materialien angebracht sind. Werden die Testmassen von der Erde unterschiedlich stark angezogen, wirkt ein Drehmoment auf den Stab, und die Rückstellkraft wird gemessen. Mit wesentlich verbesserten Drehwaagen lässt sich heute das schwache Äquivalenzprinzip auf $< 10^{-12}$ genau testen, und für die Messung von G werden derzeit mit Drehwaagen die genauesten Ergebnisse erzielt, siehe Kap. 4. Jedoch lassen sich auch mit anderen Verfahren wie Balkenwaagen oder $Fabry - Pérot$ Pendeln gute Resultate erzielen, siehe Kap. 3.

3 Die Entwicklung seit 1982

Eine Messung von G aus dem Jahre 1993 durch *Adrian Cornaz* und seine Kollegen [5] an der Universität Zürich bestätigte zunächst den CODATA-Wert, war aber ungenauer (810 ppm). Das Experiment nutzte die Gravitationswirkung von Wasser in einem Pumpspeicher-Stausee auf zwei Testmassen von je einem Kilogramm, die sich ober- beziehungsweise unterhalb des Wasserspiegels befanden. Mit einer Hochpräzionswaage wurde der Gewichtsunterschied der Testmassen bei variablem Wasserstand - und sich dementsprechend ändernder Gravitationswirkung - gemessen und daraus G bestimmt. Das Ergebnis war zwar ungenauer als die Labormessungen, aber mit diesen verträglich.

Doch dann sorgte 1995 eine Gruppe von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig für erhebliche Unruhe [6]. Sie fand einen deutlich - um 0,6 Prozent - höheren Wert von G mit einer niedrigeren Messunsicherheit (83 ppm) - er war mit allen anderen Messungen unverträglich. Die Braunschweiger Wissenschaftler hatten die Testkörper nicht wie *Luther* und *Towler* an einen dünnen Faden gehängt, sondern auf Quecksilber schwimmen lassen. Auf diese Weise konnten sie größere Massen verwenden und hatten gehofft, die Gravitationswirkung entsprechend genauer zu messen. Ihr abweichendes Resultat gab tatsächlich dem Forschungsgebiet neue Schubkraft - zumal fast gleichzeitig eine Gruppe vom Measurements Standard Laboratory in Neuseeland ein Messergebnis unterhalb des 1986er CODATA-Wertes meldete, das ebenfalls - nur in entgegengesetzter Richtung - ausserhalb der Fehlerschranken des CODATA-Wertes lag. Dieses Resultat wurde jedoch 1998 korrigiert: Die Gruppe hatte bei der Berechnung des Trägheitsmoments den Durchmesser des Zylinders am Torsionsfaden vernachlässigt - eine, wie sich herausstellte, unzulässige Approximation.

Es gibt auch prinzipiell andere Ansätze. Beispielsweise verwendet eine Gruppe um *Hinrich Meyer* [7] an der Universität Wuppertal ein $Fabry - Pérot$ Pendel, Abb. 2. Bei dieser Anordnung entfallen bestimmte systematische Fehlerquellen; ausserdem kann anhand der Messergebnisse nicht nur G bestimmt, sondern gleichzeitig auch die $1/r^2$ - Abhängigkeit des Gravitationsgesetzes getestet werden.

Wie die Abbildung zeigt, verwenden die Wuppertaler Experimentalisten zwei Pendel in einer Vakuumkammer, deren Abstand von der Gravitationskraft abhängt, die zwei Feldmassen auf sie ausüben. Die Entfernung zwischen Feldmassen und Pendeln wird zwischen 0,7 und 2,2 Metern variiert; das erzeugt Unterschiede in den Pendelabständen von bis zu 20 Nanometern. Durch die symmetrische Anordnung lassen sich Fehlerquellen aufgrund ungenauer Abstandsmessung Feldmasse-Pendel reduzieren.

Die Pendel bilden einen $Fabry - Pérot$ Resonator, dessen Resonanzfrequenz vom Pendelabstand abhängt. Sie lässt sich mit hoher Genauigkeit messen, so dass Abstandsänderungen von wenigen Pikometern nachweisbar sind. Dabei muss auf eine Drift der Resonanzfrequenz korrigiert werden. Sie kommt hauptsächlich durch thermische Ausdehnung eines Quarzstreifens zustande, mit dem der Pendelabstand nahe an den

Aufhängepunkten präzise fixiert wird. In einer neueren Version des Experiments wird Zerodur statt Quarz verwandt - wegen des 40fach kleineren Ausdehnungskoeffizienten verringert das die Unsicherheiten der Messung.

Aus der Abstandsänderung Δb der Pendel (Abstand b) bei einer Verschiebung der Feldmassen von einer Referenzposition r_{ref} zu einer neuen Position r (Abstand zwischen Feldmasse und jeweils erstem Pendel), der Pendel-Eigenfrequenz ω_0, der Größe der Testmasse M (die bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt sehr genau gemessen wurde) und präzise berechneten Korrekturfaktoren K_r, K_{ref} für die endliche Ausdehnung der beteiligten Massen wird G bestimmt [7]

$$G = \frac{(\Delta b)\omega_0^2}{M}\left[\left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+b)^2}\right)K_r - \left(\frac{1}{r_{ref}^2} - \frac{1}{(r_{ref}+b)^2}\right)K_{ref}\right]^{-1}. \tag{4}$$

Das Ergebnis einer neueren Messung von G mit bereits verbesserter Apparatur ist in Abb. 6 (*Kleinevoss et al.*) dargestellt; es ist mit den nach 1995 publizierten Drehwaagen-Experimenten verträglich, hat aber größere Fehlerschranken.

Besonders interessant ist das Messprinzip eines Teams um *Walter Kündig*, der vorher mit anderen das Stausee-Experiment durchgeführt hatte, am Physik-Institut der Universität Zürich [8]. Die Schweizer Forscher vergleichen das effektive Gewicht von zwei Ein-Kilogramm-Massen, die auf unterschiedlicher Höhe an den beiden Armen einer Balkenwaage hängen und durch zwei große Feldmassen beeinflusst werden. Befinden sich diese auf halber Höhe zwischen den beiden Testmassen, erhöht sich das Gewicht der oberen, während sich das der unteren reduziert. Das Umgekehrte gilt, wenn die eine Feldmasse über die obere und die andere unter die untere Testmasse gebracht wird. Die Änderung des Gewichtsunterschiedes ist proportional zur Gravitationskraft, welche die Feldmassen auf die Testmassen ausüben. Die Messung wird oftmals wiederholt und aus dem Mittelwert - bei bekannter Massenverteilung - G berechnet.

Dieser Versuch liefert aus mehreren Gründen sehr genaue Resultate. Da die Erdanziehung unabhängig von der Position der Testmassen ist, fällt sie aus der Messung heraus. Dasselbe gilt für die Gezeitenkraft. Die Testmassen sind aus vergoldetem Kupfer, was den Einfluss magnetischer Kräfte klein hält. Um Dichte- Inhomogenitäten zu minimieren, dienen Flüssigkeiten statt Festkörper als Feldmassen: Evakuierte Behälter aus

25 Millimeter dickem Chromstahl werden mit 500 Liter Flüssigkeit befüllt.

Messungen wurden mit Wasser und Quecksilber gemacht. Das Quecksilber wirkt auf die Testmassen wie 2000 Tonnen Wasser, was die Bestimmung von G erleichtert. Die Resultate mit den beiden Flüssigkeiten stimmen weitgehend berein. Das neue Ergebnis aus dem Jahr 1998/99 (Abb.6, *Nolting et al.*)

$$G = 6,6749(14)10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}, \tag{5}$$

ist genauer als das $Fabry - Pérot$ Resultat, aber momentan noch ungenauer als die besten Ergebnisse mit Drehwaagen. Immerhin bestehen realistische Aussichten, die Fehlergrenze durch Verbesserungen beim Vakuum-System und der Temperaturkontrolle in nicht allzu ferner Zukunft wie bei den neuesten Drehwaagen-Messungen in den Bereich von 10 ppm zu reduzieren - das wäre ein erheblicher Fortschritt.

Die meisten neueren Ergebnisse sind etwas größer als der 1986er CODATA-Wert; jedoch ist keines mit dem Wert der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt verträglich. Es scheint deshalb möglich, dass den Braunschweiger Physikern bei ihrer Messung ein systematischer Fehler unterlaufen ist. Welcher das gewesen sein könnte, wird sich wohl nicht mehr feststellen lassen, da das Experiment abgebaut wurde.

Ende 1998 gelangte das Committee on Data for Science and Technology angesichts der bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden unterschiedlichen Messungen von G zu der Einschätzung, dass in den Jahren seit 1986 nicht nur kein wesentlicher Fortschritt erzielt worden sei, sondern auch die Unsicherheiten *größer* geworden seien. Als neuer Wert für G wird seitdem von CODATA empfohlen [9]

$$G = 6,673(010)10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}, \tag{6}$$

entsprechend einer Unsicherheit von 1500 ppm: Eine Situation, über die in diesem Gebiet aktive Wissenschaftler nicht erfreut sind. Immerhin waren seit der letzten Festlegung 1986 die Unsicherheiten bei anderen Naturkonstanten um das Fünf- bis Zwölffache verkleinert worden. Nur die Gravitationskonstante fällt aus dem Rahmen und ist mit einer "offiziellen" Messunsicherheit von 0,15 Prozent zwölfmal schlechter bekannt als 1986. Das über zweihundert Jahre alte Ergebnis von Cavendish ist somit lediglich um das Zehnfache verbessert worden. Immerhin sind jetzt alle wesentlichen Experimente zur Messung von G, die seit 1995 - also nach der PTB-Messung - publiziert wurden, mit diesem Wert verträglich, siehe Abb. 6.

4 Das Seattle-Experiment

Die Hauptfehlerquellen bei Messungen mit Drehwaagen, die meist als kleine Hanteln ausgeführt werden, sind Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Massenverteilung, und eine mögliche Inelastizität des Aufhängefadens. Um diese Fehlerquellen auszuschalten und einen deutlich genaueren Messwert für G im Bereich von einem Hunderttausendstel (10 ppm) zu erreichen, haben *Eric Adelberger, Jens Gundlach* und ihre Kollegen an der Universität von Washington in Seattle eine völlig neuartige, im Hochvakuum von etwa $10^{-5} Pascal$ rotierende Torsionswaage konstruiert.

Dabei verwenden sie ein dünnes Plättchen an einem Torsionsfaden aus Wolfram (Abb.3). Bei dieser Geometrie - anstelle der sonst üblichen Hanteln - wird die gravitative Winkelbeschleunigung nahezu unabhängig von der genauen Massenverteilung. Abhängigkeiten von der Gestalt, der Gesamtmasse und der Verteilung der Masse über das Plättchen mitteln sich in der Analyse heraus. Das Torsionspendel ist auf einem Drehtisch montiert; auf einem weiteren äusseren Drehtisch sind die anziehenden sphärischen, einander gegenüberliegenden Feldmassen angeordnet (Abb.4).

Dreht sich der innere Tisch mit konstanter Winkelgeschwindigkeit (etwa eine Umdrehung in 20 Minuten), wird das Torsionspendel zweimal pro Umdrehung durch die Wechselwirkung mit den Feldmassen erst beschleunigt, dann abgebremst. Wenn man statt dessen den inneren Drehtisch mit einer elektronischen Regelung jeweils passend abbremst und beschleunigt, bleibt der Torsionsfaden in Ruhe, und die Messung wird unabhängig von den genauen mechanischen Eigenschaften des Fadens einschliesslich möglicher Inelastizitäten. Eine wichtige Fehlerquelle früherer Experimente mit Drehwaagen ist auf diese Weise vollständig ausgeschaltet. Messgröße ist jetzt - statt der unterdrückten Torsion des Fadens - der Drehwinkel des inneren Tisches als Funktion der Zeit. Da Massen aus der Umgebung ein Signal erzeugen, das eliminiert werden muss, wird auch der äussere Drehtisch im Gegensinn zum inneren etwa einmal in 5 Minuten gedreht; die Differenz der beiden Drehfrequenzen wird konstant gehalten. Schliesslich wird die Winkelbeschleunigung $\alpha(\phi)$ als zweite Zeitableitung bestimmt und nach Multipolen entwickelt [10]:

$$\alpha(\phi) = -\frac{4\pi G}{I} \sum_{l=2}^{\infty} \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{+l} m q_{lm} Q_{lm} e^{im\phi}. \tag{7}$$

Hier bei sind die q_{lm} die Multipolmomente des Pendels und die Q_{lm} die Multipolfelder der externen Massenverteilung, ϕ ist der Winkel des Drehtisches in Bezug auf die Feldmassen, und I ist das Trägheitsmoment des Pendels. Die Reihenentwicklung konvergiert schnell; der größte Term ist der mit $l = m = 2$:

$$\alpha_{22}(\phi) = -\frac{16\pi}{5} G \frac{q_{22}}{I} Q_{22} \sin(2\phi). \tag{8}$$

Für ein ideales, unendlich dünnes (zweidimensionales) Plättchen wird der Quotient q_{22}/I unabhängig von der Massenverteilung des Pendels, so dass

$$\frac{q_{22}}{I} \to \sqrt{\frac{15}{32\pi}} \tag{9}$$

und

$$G \approx -\alpha_{22}(\phi) \left[\sqrt{\frac{24\pi}{5}} Q_{22} \sin(2\phi) \right]^{-1}. \tag{10}$$

Durch die flache Geometrie des Pendels wird auf diese Weise die bisher größte systematische Unsicherheit von Drehwaagenexperimenten, der Einfluss der Massenverteilung, weitgehend ausgeschaltet. Zusätzliche Korrekturen berücksichtigen die endlichen Ausmaße des Plättchens und andere Störfaktoren [10]. Schliesslich ergibt die Analyse den bisher bei weitem genauesten Wert von G,

$$G = 6,674215(92) 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2} \tag{11}$$

mit einer Unsicherheit von nur 14 ppm (siehe Abb. 6). Dieses Ergebnis ist 0,024 Prozent über dem CODATA-Resultat von 1986. Mit dem bekannten Wert [11] für $GM_\oplus$ erhält man daraus die Erdmasse als

$$M_\oplus = 5,972245(82)10^{24} kg \tag{12}$$

und mit $GM_\odot$ [12] die Sonnenmasse als

$$M_\odot = 1,988435(27)10^{30} kg. \tag{13}$$

Ob die im Seattle-Experiment gefundene signifikante Abweichung vom 1986er CODATA-Wert auf Dauer Bestand hat, wird sich erst zeigen müssen: Die bisherige Geschichte der Messungen dieser fundamentalen Naturkonstanten zeigt, wie schwierig endgültige Festlegungen mit kleinen Fehlerschranken sind. Erst wenn einige voneinander unabhängige Messungen - die möglichst auch auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhen sollten - zum gleichen Resultat konvergieren, wird das Ergebnis auf breite Akzeptanz stoßen.

Dabei wäre es bereits ein deutlicher Fortschritt, wenn unabhängige Messungen auf einem Niveau von 0,01 Prozent miteinander übereinstimmten. Bis eine Übereinstimmung im Bereich von 0,001 Prozent (10 ppm) - der jetzigen Genauigkeit des Seattle-Experiments - erreicht sein wird, werden sicher noch erhebliche Anstrengungen erforderlich sein. Ein präziser experimenteller Wert für G wird in Zukunft von zentraler Bedeutung sein - nicht zuletzt beim Test neuer Ansätze zur Vereinheitlichung von Gravitation und Quantentheorie.

Literatur

[1] *Stephani, H.*: Allgemeine Relativitätstheorie.
Hochschulbücher für Physik, DVW, Berlin 1991.
Praxis der Naturwissenschaften/Physik 49 (2000) (5)1-3

[2] *Luther, G.G., Towler, W.R.*: Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 121

[3] *Cohen, E.R., Taylor, B.N.*: Rev. Mod. Phys. 59 (1987) 1121

[4] *Wolschin, G.*: Fortschritte bei g und G.
Spektrum d. Wissenschaft (1999) (3) 21-23

[5] *Cornaz, A., Hubler, B., Kündig, W.*: Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 1152

[6] *Michaelis, W., Haars, H., Augustin, R.*: Metrologica 32 (1995/6) 267

[7] *Walesch, H., Meyer, H., Piel, H., Schurr, J.*:
IEEE Trans. Instrum. Meas. 44 (1995) 494
Kleinevoss, U., Meyer, H., Schumacher, A., Hartmann, S.:
Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 492

[8] *Nolting, F. et al.*: Die Gravitationskonstante - eine Herausforderung an die Messtechnik. Physikalische Blätter 55 (1999) (4) 51-53
Schurr, J., Nolting, F., Kündig, W.: Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 1142
Nolting, F. et al.: Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 487

[9] *Mohr, P.J., Taylor, B.N.*: J. Phys. Chem. Ref. Data 28 (1999) 1713

[10] *Gundlach, J.H., Merkowitz, S.M.*: Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2869

[11] *Ries, J.C. et al.*: Geophys. Res. Lett. 19 (1992) 529

[12] Astronomical Almanac for 2001,
US Government Publishing Office (1999) k6

Quellenangaben

Abb. 1: *R.v. Eötvös, D. Pekár, E. Fekete,*
Annalen der Physik, 4. Folge, 68 (1922) 11.

Abb. 2: *H. Meyer*, Universität Wuppertal.

Abb. 3: *E. Adelberger, J.Gundlach, S.Merkowitz et al.*, University of Washington, Seattle, WA 98195 .

Abb. 4, 5, 6: *J. Gundlach, S. Merkowitz*, University of Washington, Seattle, WA 98195.

((Verlag: Bitte bei Profs. E. Adelberger, J. Gundlach und H. Meyer die Abdruckgenehmigungen einholen.))

Emails: eric@npl.washington.edu (Adelberger) , gundlach@npl.washington.edu
sowie Prof. H. Meyer, U Wuppertal, FB Physik, GaussStr.20, 42097 Wuppertal,
Hinrich.Meyer@desy.de))

Bildlegenden

Abb.1: Die von *Roland Eötvös* und seinen Kollegen 1922 zur Suche nach Abweichungen vom Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität verwendete Drehwaage im Querschnitt.

Abb.2: Das von *Hinrich Meyer* und seinen Kollegen an der Universität Wuppertal zur Messung von G verwendete $Fabry - Pérot$ Pendel.

Abb.3: Schnittzeichnung der von *Jens Gundlach* und $StephenMerkowitz$ an der Universität von Washington in Seattle zur Hochpräzisions-Messung von G eingesetzten, im Hochvakuum rotierenden Drehwaage.

Abb.4: Foto der an der Universität von Washington in Seattle zur Messung von G verwendeten Drehwaage. Die Kugelmassen haben 12,5 Zentimeter Durchmesser. Siehe Abb. 3 zur Erklärung der Bauteile.

Abb.5: Detail-Foto der an der Universität von Washington in Seattle zur Hochpräzisions-Messung von G eingesetzten Drehwaage. Gezeigt ist das an einem Torsionsfaden aufgehängte, im wesentlichen zweidimensionale rechteckige Pendel. Ein Penny verdeutlicht die Größenverhältnisse.
((Die Farb-Bilder 5 und 6 eignen sich für eine innere Umschlagseite)).

Abb.6: Nach 1995 publizierte Messungen von G mit Unsicherheiten $\Delta G/G < 1000ppm$. Der Name des ersten Autors ist jeweils angegeben. Der zur Zeit gültige CODATA-Wert ist Ende 1998 in den hier dargestellten Einheiten als 6,673 mit einer Unsicherheit von 1500 ppm festgelegt worden. Alle in diesem Diagramm gezeigten Messungen - sowohl die mit Drehwaagen, als auch mit einer Balkenwaage (*Nolting et al.*) und einem $Fabry - Pérot$ Pendel (*Kleinevoss et al.*) - fallen in diesem Bereich.