

# Zur genauen Bestimmung der Gravitationskonstante $G$ mit Laser-Interferometern im Labor

von Dipl.-Ing. Peter Pohling, Palitzsch-Gesellschaft Dresden

Juli 2017

Die ungenügende Genauigkeit der Gravitationskonstanten  $G$  bzw.  $\kappa$  sind ein Grundproblem der Physik und der Metrologie [1, S. 6]. Die Unsicherheiten der Zahlenwerte der Gravitationskonstante

$$G = \frac{c^4}{8\pi} \cdot \kappa \quad (1)$$

in der Newton'schen Feldgleichung

$$\nabla^2 \Phi_N = 4\pi G \rho \quad (2)$$

und der Konstante  $\kappa$  in den Einstein'schen Feldgleichungen

$$R^{\bar{j}} - \frac{1}{2} R g^{\bar{j}} = \kappa T^{\bar{j}} \quad (3)$$

sind um den Faktor  $10^5$  größer als bei atomaren und den elektrischen Naturkonstanten.

Die Technologien der Gravitationswellen-Observatorien **GEO600** und **LIGO** (Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory) [2] werden es nunmehr erlauben, diese fundamentalen Konstanten um den Faktor 10, möglicherweise sogar um mehr als den Faktor Hundert genauer zu bestimmen.

Einleitend werden Schwachstellen bei den bisherigen Messungen von  $G$  erörtert und der prinzipielle Aufbau eines Laser-Interferometer-Experimentes für den typischen Bereich der *sehr schwachen* Gravitationsfelder vorgestellt. Eine Vielzahl von astronomischen Beobachtungen [3] und die extrem hohen Streuungen der Messergebnisse zur Bestimmung von  $G$  bei Feldstärken unter  $10^{-8} \text{ m/s}^2$  werden in der Metrologie sowie in der Kosmologie und Astrophysik kontrovers diskutiert. Das hier vorgeschlagene Laser-Gravitationsexperiment **LIGL** bzw. **LIGLAB** bietet völlig neue experimentelle Möglichkeiten, etablierte und alternative Gravitationstheorien in dem „dunklen“ Gebiet der Nano-Feldstärken auf den Prüfstand zu stellen.

## 1. 330 Jahre Newton's Gravitationsgesetz, 220 Jahre Gravitationskonstante, 33 Jahre Rätselraten

Die Experimente zur Bestimmung der Gravitationskonstante  $G$  basieren auf der Newton'schen Kraft

$$F_N = G \frac{M \cdot m}{R^2} \quad (4)$$

zwischen den Massen  $M$  und  $m$  bei unterschiedlichen Abständen  $R$ .

Der Zahlenwert der Gravitationskonstante

$$G_{\text{Cav}} = \frac{F_N \cdot R^2}{M \cdot m} = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (5.1)$$

wurde 1798 erstmals von Henry Cavendish [4] mit einer *Torsions-Drehwaage*

( $M = 2 \times 158 \text{ kg}$ ,  $m = 2 \times 0,73 \text{ kg}$ ) bestimmt. Der Wert weicht nur 1,2 % von dem aktuellen Wert [4]

$$G_{\text{CODATA-2015}} = (6,67408 \pm 0,00031) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (5.2)$$

ab. Die *Unsicherheit* des Wertes von 1986

$$G_{\text{CODATA-1986}} = (6,67259 \pm 0,00013) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (5.3)$$

musste 1998 von CODATA um mehr als das Zehnfache vergrößert werden [5, S. 426]:

$$G_{\text{CODATA-1998}} = (6,673 \pm 0,0015) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (5.4)$$

Es gab dafür zwei Ursachen:

1. Die erstmals bei **LIGO**-Pendeln entdeckte *Frequenzabhängigkeit* der *Federkonstanten* von Torsionsfäden und
2. die „auffallend stark abweichende Messung der **PTB**“ (Braunschweig, 1996) bei *sehr kleinen Feld-Massen*  $M$  ( $4 \times 900 \text{ g}$ ) [6, S. 10].

## 2. Betrachtung der Fehlerquellen bei Experimenten mit Torsionswaagen und Gravimetern

Für die Bestimmung der Gravitationskonstante werden überwiegend Torsionswaagen verwendet. Die 1995 entdeckte Frequenzabhängigkeit der Federkonstanten ergab bei Nachkontrollen systematische Fehler, die „häufig größer als der jeweils angegebene Gesamtfehler“ waren [6, S. 10].

Weitere Ursachen für Unsicherheiten können die sehr unterschiedlichen Masse/Abstands-Quotienten der bisherigen Experimente sein:

- Die Abstände  $R$  variierten zwischen einigen Millimetern und mehreren Metern und
- die Feld-Massen  $M$  liegen zwischen 900 Gramm und mehreren Tonnen.

Bei Gültigkeit des Newton'schen Gesetzes müssten die unterschiedlichen  $M/R^2$ -Quotienten bedeutungslos sein. Bei jedem Abstand sollte sich der gleiche Wert für die Gravitationskonstante  $G$  ergeben. Aber schon vor 30 Jahren kamen erste Zweifel auf:

*„Im Jahre 1986 führte eine Reanalyse der Daten des Eötvös Experimentes durch E. Fischbach zu der Annahme, daß es neben den bekannten Kräften noch eine „fünfte Kraft“ gibt, welche sich in einer Verletzung des  $1/r^2$  Verhaltens der Gravitationskraft manifestiert. Dadurch motiviert, sowie durch die große Streuung der Meßwerte der Newtonschen Konstante  $G$ , wurde an der Bergischen Universität ein Experiment aufgebaut dessen Bezeichnung – Fabry-Pérot Gravimeter – sich auf das Herz des Experimentes, ein Fabry-Pérot Resonator, bezieht.“* [6, S. 14]. Die Feld-Massen  $M$  sind bei dem Wuppertaler Experiment spiegelbildlich angeordnet. Die zwei Testmassen  $m$  mit je 3,30 kg bilden ein Pendelpaar. Die Pendel werden durch zwei Feld-Massen  $M$  (2·576 kg) ausgelenkt. Die Auslenkwinkel  $\varphi$  sind extrem klein, weil durch die symmetrische Anordnung der Pendel (Abstand nur 24 cm) die Feld-Massen gerade entgegengesetzt auf die Pendelmassen wirken. Die Feld-Massen  $M$  konnten synchron von  $R = 0,91$  m bis 2,30 m versetzt werden. Damit sollte das Gravitationsgesetz bei unterschiedlichen Abständen überprüft werden. Die gemessenen Abstandsänderungen  $\Delta b_{\text{Messung}}$  setzten sich lt. [6, S. 83] zusammen aus einer gravitativen Abstandsänderung  $\Delta b_{\text{Gravitation}}$  und einer Abstandsänderung  $\pm \Delta b_{\text{Neigung}}$  infolge einer „Neigung“ des Wuppertaler Labor-Fundamentes:

*„Als Grund für eine Neigung des Experimentes ergab sich die Deformation im Bereich des Stützgerüsts, ausgelöst durch die hohe Belastung des Bodens aufgrund der Feld-Massen. Da diese Deformation des Fundaments abhängig von der Feldmassenposition ist, täuscht sie eine entfernungsabhängige Abweichung vom Gravitationsgesetz vor. Diese Abweichung der Meßwerte vom reinen  $1/r$  Potential ist in den älteren Arbeiten an diesem Meßaufbau schon beobachtet ..., aber nie explizit vermessen worden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb der funktionale Zusammenhang zwischen Neigung und Feldmassenposition ermittelt, so daß die gemessenen Auslenkungen der Spiegel entsprechend korrigiert werden können. Da die Neigung der Apparatur zwar für die Gravitationsmessungen signifikant ist, aber absolut betrachtet sehr klein ( $< 0,1 \mu\text{rad}$ ), war es nicht möglich die Neigung direkt mit einem Neigungsmesser aufzulösen“* [6, S. 83].

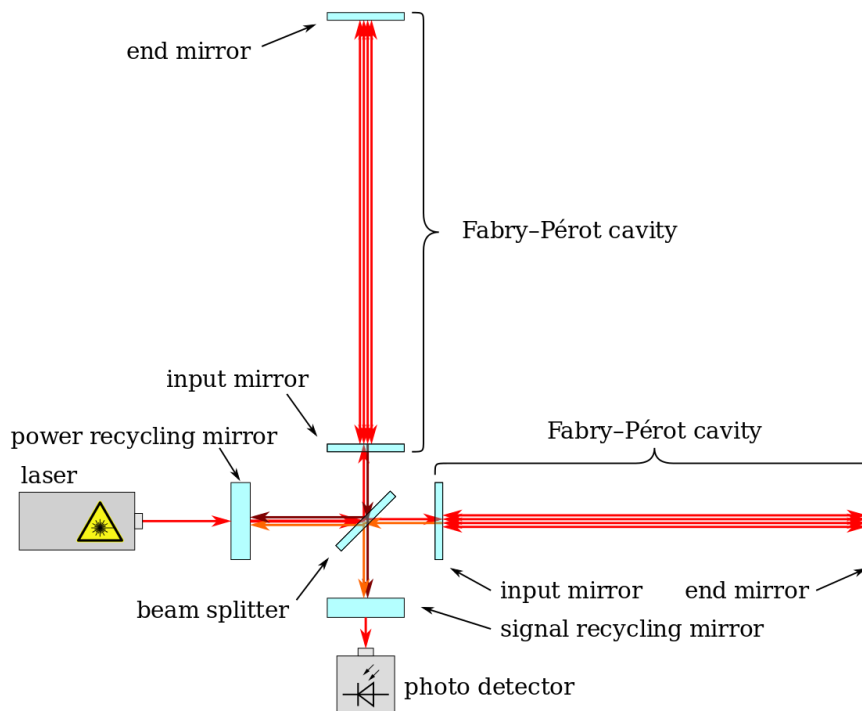
Erstaunlicherweise wird sich im **Abschnitt 5** aus der Theorie mit Gl. (13) die Wuppertaler „Neigung“ im **Bild 5** ergeben. Das **LIGLAB**-Konzept hat das Potenzial, einen Quantensprung zur Verringerung der Streuungen bei der Bestimmung der Gravitationskonstante zu schaffen.

## 3. Genauere Messung der Gravitationskonstante mit der Gravitationswellen-Technologie

Die Mess-Arme des Gravitationswellen-Detektors **LIGO** mit einer Länge von 4 km gemäß **Bild 1** sind *rechtwinklig* angeordnet. Die **LIGLAB**-Messstrecken des Michelson-Interferometers mit ca. 4 m sind bei dem Laborexperiment tausendfach kürzer. Die Laserstrahlen laufen ebenfalls mehrfach zwischen den vier Spiegeln (mirror) hin und her. Je zwei Spiegel bilden einen Fabry-Pérot-Resonator. Die *rechtwinklige* Anordnung als Michelson-Interferometer bietet gegenüber dem Wuppertaler Fabry-Pérot-Mikrowellenresonator ganz entscheidende Vorteile:

- Die schweren Wuppertaler Feld-Massen  $M_1$  und  $M_2$  mit 2·576 kg können durch die bessere Auflösung verkleinert werden. Das verringert die Feldstärken und die Neigungserscheinungen.
- Die Vektoren der horizontalen Feldstärkekomponenten stehen bei **LIGLAB**-Interferometer *senkrecht* aufeinander und kompensieren sich nicht, wie bei dem Wuppertaler Gravimeter [6].
- Die Feld-Massen  $M_1$  und  $M_2$  tragen die End-Spiegel (end mirror). Es können sowohl die Abstände  $R$  als auch die Feld-Massen  $M$  quasistatisch bzw. dynamisch variiert werden.

Als Testmassen  $m$  (input mirror) eignen sich für erste Versuche die anfangs bei **LIGO** verwendeten Pendel (Durchmesser 25 cm, Dicke 10 cm, Masse 11 kg) [2].



**Bild 1:** Vereinfachter Aufbau des **LIGO**-Experiments, übernommen von [7]

Die Verringerung der Messstrecken hat eine geringere Auflösung zur Folge. Die Situation bei den geringen Längenänderungen verdeutlichen die Beispiele im **Bild 2**. Die Gravitationskonstante hat bei dem noch aktuellen **CODATA**-Wert von 2015 eine Unsicherheit von  $4,7 \cdot 10^{-5}$ .

Bei dem **LIGLAB**-Experiment könnten sich die Unsicherheiten verringern

- um den Faktor 10 in der Probephase und
- um mehr als den Faktor 100 in der Ausbauphase.

Das wäre der erreichbare „Quantensprung“ bei der Genauigkeit von  $G$  seit Cavendish vor 220 Jahren.

Messtrecken	Längenänderungen	Verhältnisse
<b>LIGO</b> -Armlänge 4 km	1/1000 des Protonendurchmessers: $10^{-18}$ m	$10^{-18}$ m / $4 \cdot 10^3$ m = $0,25 \cdot 10^{-21}$
<b>LIGLAB</b> -Armlänge 4 m	1/1000 des Protonendurchmesser: $10^{-18}$ m	$10^{-18}$ m / 4 m = $0,25 \cdot 10^{-18}$
Mond-Erde 384 400 km	Wasserstoff-Atom: Durchmesser $2a_0 = 1,1 \cdot 10^{-10}$ m	$1,1 \cdot 10^{-10}$ m / $3,844 \cdot 10^8$ = $0,26 \cdot 10^{-18}$
Entfernung 384 400 km Mond-Erde	Pendel-Testmassen $m$ (input mirror) Auslenkung $\Delta x = 1,3 \cdot 10^{-10}$ m durch $M = 100$ kg im Abstand $R = 4$ m:	$1,3 \cdot 10^{-10}$ / $3,844 \cdot 10^8$ = $0,34 \cdot 10^{-18}$ bei $a_N = 4,2 \cdot 10^{-10}$ m/s <sup>2</sup>

**Bild 2:** Vergleich des Laser-Interferometers **LIGLAB** für sehr schwache Felder mit dem Laser-Interferometer **LIGO** für Gravitationswellen und am Beispiel der „Entfernung Mond-Erde“ zum Atomdurchmesser und zur geringsten Auslenkung bei  $R = 4$  m

Wenn die Auslenkungen  $\Delta x$  von ca.  $10^{-10}$  m mit einer Genauigkeit von  $1 \cdot 10^{-7}$  gemessen werden, sollte das Laser-Interferometer **Auflösungen von  $10^{-17}$**  erreichen.

Das erfordert technisch-technologische Maßnahmen, wie die

- Aufhängung der Pendel in Vakuum-Kryostat-Behältern und vor allem die aufwendige
- Abschirmungen gegen elektromagnetische, thermische und seismologische Störungen.

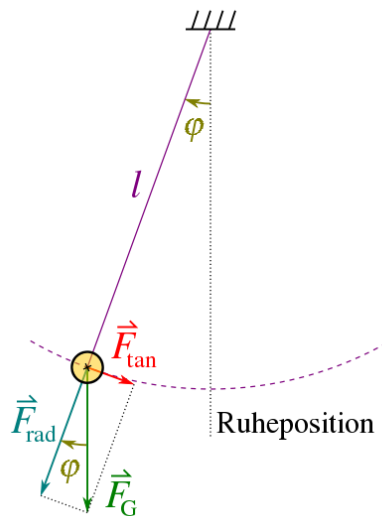
Die erforderlichen experimentellen Möglichkeiten existieren inzwischen in einigen Laboratorien.

#### 4. Das Kräftepiel zwischen Pendel und Feld-Masse

Bei einer Auslenkung  $\Delta x = 1,3 \cdot 10^{-10}$  m der Pendel-Testmassen gemäß **Bild 2** beträgt der Auslenkwinkel  $\varphi = 4,2 \cdot 10^{-11}$ . Die horizontale Kraft-Komponente im **Bild 3**, die Tangentialkraft

$$F_{\text{tan}} = F_G \cdot \varphi = F_G \frac{\Delta x}{l} = m \cdot g_N \frac{\Delta x}{l} \quad (6)$$

ist bei dieser winzigen Auslenkung das Produkt der Erdanziehungskraft  $F_G$  mit dem Auslenkwinkel  $\varphi$ . Im rechten Term von Gleichung (6) ist die Erdanziehungskraft durch die Normalbeschleunigung  $g_N$  und der Pendelmasse  $m$  ersetzt.



**Bild 3:** Die Kraftvektoren bei Auslenkung eines Pendels um den Winkel  $\varphi$ ,  
Grafik von Wikimedia/Stündle

Da die Erdanziehungskraft  $F_G$  nicht ausreichend genau bekannt ist, wird die Normalbeschleunigung  $g_N$  über eine genaue Messung der Eigenfrequenz  $f_0$  (bzw. der Schwingungsdauer  $T$ ) der Pendel bestimmt. Aus dem Quadrat der Kreisfrequenz  $\omega_0$  und der Pendellänge  $l$  ergibt sich die Normalbeschleunigung

$$g_N = \omega_0^2 l = (2\pi f_0)^2 l = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 l \quad (7)$$

Aus den Gln. (4), (6) und (7) folgt das Kräfte-Gleichgewicht der horizontalen Kraft-Komponenten:

$$G \frac{M}{R^2} \cdot m = \omega_0^2 l \cdot \frac{\Delta x}{l} \cdot m \quad (8)$$

Die Bestimmungsgleichung für  $G$  vereinfacht sich, weil  $m$  und  $l$  entfallen:

$$G = \Delta x \cdot \omega_0^2 \frac{R^2}{M} \quad (9)$$

Die variablen Größen der Messung sind die Auslenkungen  $\Delta x = \Delta R$  bei unterschiedlichen Abständen  $R$ . Die System-Konstanten des Laborexperiments sind die Feld-Massen  $M$  und die Kreisfrequenzen  $\omega_0$ .

#### 5. Die Gesetze der Gravitation auf dem Prüfstand - der Kosmos im Labor

Für die Stärke der Gravitationswirkung sind die Feldstärken

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\Phi}{R} \quad (10)$$

maßgebend. Mit Newtons Gesetz nach Gl. (4) lassen sich die Potenziale  $\Phi_N$  und die Feldstärken

$$a_N = \frac{\Phi_N}{R} = G \frac{M}{R^2} \quad (11)$$

der Planeten unseres Sonnensystems vorhersagen. Unser Planetensystem ist ein typisches Beispiel für den klassischen *Bereich der schwachen Feldstärken*. Im **Bild 4** erstreckt sich der Bereich schwacher Feldstärken etwa von der Venus (0,72 AE;  $1,13 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2$ ) bis zum Neptun (30 AE;  $6,55 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$ ). Die Lichtablenkung am Rand der Sonne und die Periheldrehung des Merkurs lassen sich mit den Newton'schen Dynamik nicht ausreichend genau erklären. Bei der Merkur-Periheldrehung konnte Einstein's **ART** die Rest-Abweichung von 0,47 Bogensekunden zwischen Le Verriers Beobachtung und Newtons Dynamik erklären. In der Einstein'schen Domäne *starker* Feldstärken stimmen die Vorhersagen seiner Theorie hervorragend mit den Beobachtungen überein.

<b>Feldstärke a</b> (Theorienbereich)	<b>Objekt</b> Bezeichnung	<b>Radius bzw.</b> Entfernung	<b>Newt.-Feldst.</b> $a_N$ in $\text{m/s}^2$	<b>Real-Feldst.</b> $a_R$ in $\text{m/s}^2$	<b>Abweichung</b> $(a_R/a_N) - 1$ in %
<b>stark</b> (Einsteins ART)	Neutronenstern	10,2 km	$1,2808 \cdot 10^{12}$	$1,2808 \cdot 10^{12}$	0,0000
	Sonne	$7,0 \cdot 10^5$ km	$2,7367 \cdot 10^2$	$2,7367 \cdot 10^2$	0,0000
	Merkur	0,387 AE	$3,9572 \cdot 10^{-2}$	$3,9572 \cdot 10^{-2}$	0,0000
<b>schwach</b> (Newton-Dynamik)	Venus	0,723 AE	$1,1344 \cdot 10^{-2}$	$1,1344 \cdot 10^{-2}$	0,0000
	Jupiter	5,203 AE	$2,1904 \cdot 10^{-4}$	$2,1904 \cdot 10^{-4}$	0,0000
	Neptun	30,07 AE	$6,5579 \cdot 10^{-6}$	$6,5580 \cdot 10^{-6}$	0,0015
<b>extrem schwach</b> (Milgroms <b>MO</b> diffiz. Newton-Dynamik)	Sedna	500 AE	$2,3719 \cdot 10^{-8}$	$2,3815 \cdot 10^{-8}$	0,4057
	2014 FE72	2155 AE	$1,2768 \cdot 10^{-9}$	$1,3736 \cdot 10^{-9}$	7,5356
	$a_N = a_K$ bei $R_K$	<b>7850 AE</b>	<b><math>0,9623 \cdot 10^{-10}</math></b>	<b><math>1,9244 \cdot 10^{-10}</math></b>	<b>100,0000</b>
	Oortsche Wolke	100 000 AE	$5,9297 \cdot 10^{-13}$	<b><math>0,9681 \cdot 10^{-10}</math></b>	16.226,0000

**Bild 4:** Die Bereiche starker, schwacher und sehr schwacher Feldstärken  $a = 1,28 \cdot 10^{+12} \text{ m/s}^2$  am Rand eines Neutronensterns mit Sonnenmasse bis  $a_N = 5,93 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}^2$  am Rand der Oortschen Wolke

Die Einstein'sche Gravitationstheorie stimmt im Bereich *schwacher* Feldstärken mit der Newton'schen Theorie überein [1]. Die Mehrzahl der Astrophysiker und Kosmologen ist von der Gültigkeit der Newton'schen Feldgleichung (2) und der Einstein'schen Feldgleichungen (3) für den sich daran anschließenden Bereich der *sehr schwachen* Nano-Feldstärken überzeugt. Als Ursache für die Bahnstörungen der Zwergplaneten wird ein Planet (Planet X oder Nine) gesucht. Auch in den Randbereichen der Galaxien-Haufen und der Galaxien weicht die Newton'sche Theorie ohne die Zuhilfenahme der hypothetischen Dunklen Materie dramatisch von den beobachteten Feldstärken, Potenzialen, Geschwindigkeiten und Lichtablenkungen ab.

Eine Alternative ist das sog. Real-Potenzial der von mir konzipierte Real-Potenzial-Theorie [8 und 9]. Es besteht aus den Newton-Potenzial  $\Phi_N$  und dem relativ konstanten Potenzial  $\Phi_K$  [10], welches nur von der wirkenden Masse  $M$  und eine Naturkonstante der Gravitation, der konstanten Quell-Flussdichte  $D_G$  abhängt. Mit dem Real-Potenzial

$$\Phi_R = \Phi_N + \Phi_k = G \frac{M}{R} + G \sqrt{D_G M} = G \left( \frac{M}{R} + \frac{M}{R_K} \right) \quad (12)$$

kann die beobachtbare Dynamik der Galaxien und Cluster erstaunlich gut *vorhergesagt* werden [8]. Zum Vergleich stehen im **Bild 4** neben Newton-Feldstärken  $a_N$  die sog. Real-Feldstärken

$$a_R = |a_N + a_G| = G \frac{M}{R^2} + G \cdot D_G = G \left( \frac{M}{R^2} + \frac{M}{R_K^2} \right) \quad (13)$$

einiger Objekte des Sonnensystems. Bei dem Objekt **2014 FE72** (Entfernung 2155 AE) ergibt sich mit meiner **RPT**-Hypothese eine Abweichung von immerhin 7,5 % bei der größten Entfernung.

Bei dem sogenannten. Konstant-Radius, dem Übergangs- oder Transitionsradius

$$R_K = \sqrt{\frac{M}{D_G}} = 7850 \text{ AE} \quad (14)$$

unseres Sonnensystems sind die Newton'sche Feldstärke  $a_N$  und die Konstant-Feldstärke  $a_G$  gerade im Gleichgewicht. Die von Mordehai Milgrom [3] gefundene Grenzfeldstärke

$$a_G = G \cdot D_G \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (15)$$

und die alternativen Modelle sind allerdings ebenso unbewiesen wie das etablierte Standardmodell der Kosmologie, bei dem der experimentelle Nachweis der Partikel der hypothetischen Dunklen Materie aussteht. Umgekehrt fehlt den alternativen Modellen noch ein „Planck'sches Gesetz“ der Gravitation für den Übergang von den *schwachen* zu den *sehr schwachen* Feldstärken. Diese höchst unbefriedigende Situation der modernen Physik überträgt den Experimentalphysikern im 21. Jahrhundert Aufgaben, die mit der Situation bei der Messung der Hohlraum-Strahlung schwarzer Körper durch Rubens, Paschen und Lummer am Ende des 19. Jahrhunderts durchaus vergleichbar sind. Die mit einem Laser-Interferometer erreichbaren Genauigkeiten ermöglichen es heute, die Gravitationskonstante genauer zu bestimmen und zugleich die widersprechenden Hypothesen für den „dunklen“ *Bereich der Nano-Feldstärken* zu testen. Im **Bild 5** sind die Feldstärken des Labor-Experiments dargestellt als Pendant zu **Bild 4** mit Nano-Feldstärken riesiger kosmischer Regionen.

Feldstärke $a$	System mit $M / \text{kg}$	Abstand $R / \text{m}$	Newt.-Feldst. $a_N / \text{m/s}^2$	Real-Feldst. $a_R / \text{m/s}^2$	Abweichung %
sehr schwach	576 (wie Gravimeter Uni Wuppertal)	1	$38,4427 \cdot 10^{-9}$	$38,5389 \cdot 10^{-9}$	0,25
		2	$9,6107 \cdot 10^{-9}$	$9,7069 \cdot 10^{-9}$	1,00
		4	$2,4027 \cdot 10^{-9}$	$2,4989 \cdot 10^{-9}$	4,00
sehr schwach	100 LIGL Laser-Interferom.	1	$6,6741 \cdot 10^{-9}$	$6,7709 \cdot 10^{-9}$	1,44
		2	$1,6685 \cdot 10^{-9}$	$1,7647 \cdot 10^{-9}$	5,77
		4	$0,4171 \cdot 10^{-9}$	$0,5133 \cdot 10^{-9}$	23,06

**Bild 5:** Vergleich der Feldstärken  $a_N$  nach Newton und  $a_R$  gemäß Real-Potenzial-Theorie im Laborexperiment **LIGLAB**

Die *sehr schwachen* Feldstärke-Komponenten des **LIGLAB**-Experiments mit beispielsweise

- $a_N = 1,67 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^2$  in horizontaler Richtung bei  $M = 100 \text{ kg}$  im Abstand von 2 m und
- $a_N = 1,28 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^2$  des Objektes **2014 FE72** im Sonnensystem bei einem Abstand von 2155 AE

liegen in gleicher Größenordnung. Die Abweichungen der von den Massen und den Abständen abhängigen Feldstärken konkurrierender Modelle sind signifikant und durch ein Laser-Michelson-Interferometer nachweisbar. Das neue Experiment **LIGLAB** ermöglicht es, etablierte und alternative Gravitationstheorien bei Feldstärken unter  $10^{-8} \text{ m/s}^2$  zu falsifizieren bzw. zu verifizieren.

## 6. Zusammenfassung

Die Nutzung der ausgereiften Gravitationswellen-Interferometer-Technologien für Laborexperimente sollte es im 21. Jahrhundert ermöglichen, die Naturkonstante  $G$  wesentlich genauer zu bestimmen.

Außerdem entscheiden die im Experiment gemessenen Auslenkungen  $\Delta x$  bei den unterschiedlichen Abständen der Feld-Massen objektiv darüber, welche Theorien der Gravitation für die großen kosmischen Bereiche der *sehr schwachen Feldstärken* der physikalischen Wirklichkeit entsprechen. Möge es interessierte Experimentalphysiker auf dieser Welt geben, die sich für die Lösung dieser dringenden Aufgaben im Sinne von Einstein's Vermächtnis begeistern können:

*„Physik ist diejenige Gruppe von Erfahrungswissenschaften,  
die ihre Begriffe auf das Messen begründet“ [11].*

#### Literatur:

- [1] Peter Pohling, Versagt Einsteins Gravitationstheorie bei sehr schwachen Feldern? Informationsblatt der Palitzsch-Gesellschaft Dresden, Jg. 18 (2017), Nr. 2, S. 3-10
- [2] Günter Spanner, Das Geheimnis der Gravitationswellen – Einsteins Vision wird Wirklichkeit, Kosmos Verlag, 2016
- [3] Jacob D. Bekenstein, The modified Newtonian dynamics – MOND and its implication for new physics, Racah Institute of Physics, Hebrew University of Jerusalem, Fig. 1 von Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 39 ©2001
- [4] Wikipedia, Gravitationskonstante, März 2017
- [5] Peter J. Mohr, Barry N. Taylor, CODATA recommended values of fundamental physical constants, 1998
- [6] Ulf Kleinevoß, Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstante  $G$ , Dissertation, Fachbereich Physik der Universität Wuppertal, Januar 2002, WUB-DIS 2002-2
- [7] Wikipedia, LIGO, Laser-Interferometer Gravitationswellen-Observatorium, März 2017
- [8] Peter Pohling, Gravitationslinsen ohne Dunkle Materie, Informationsblatt der Palitzsch-Gesellschaft, Jg. 16 (2015), Nr. 5, S. 6 – 14, unter [www.palitzschgesellschaft.de](http://www.palitzschgesellschaft.de)
- [9] Peter Pohling, Durchs Universum mit Naturkonstanten – Abschied von der Dunklen Materie, Verlag BoD, 2013, Website zum Buch: [www.naturkonstanten.de](http://www.naturkonstanten.de)
- [10] Peter Pohling, Das verborgene Potenzial der Sterne und Galaxien, Informationsblatt der Palitzsch-Gesellschaft Dresden, Jg. 17 (2016), Nr. 5
- [11] Albert Einstein, aus „Das Fundament der Physik“, 1940, in „Aus meinen späten Jahren“, Ullstein-Verlag, Frankfurt, 4. Auflage, 1952, S. 107