

Paper-ID: VGI_196804



Bedeutung und Entwicklung der absoluten Schwerebestimmung

Karl Reicheneder ¹

¹ *Geodätisches Institut 15 Potsdam, Telegrafenberg A 12*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen **56** (2), S. 37–52

1968

BibTEX:

```
@ARTICLE{Reicheneder_VGI_196804,  
  Title = {Bedeutung und Entwicklung der absoluten Schwerebestimmung},  
  Author = {Reicheneder, Karl},  
  Journal = {{{\0}sterreichische Zeitschrift f{{\"u}r Vermessungswesen}},  
  Pages = {37--52},  
  Number = {2},  
  Year = {1968},  
  Volume = {56}  
}
```



ÖSTERREICHISCHE ZEITSCHRIFT FÜR VERMESSUNGSWESEN

Herausgegeben vom
ÖSTERREICHISCHEN VEREIN FÜR VERMESSUNGSWESEN

Offizielles Organ

des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (Gruppen f. Vermessungswesen),
der österreichischen Kommission für die Internationale Erdmessung und
der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie

REDAKTION:

emer. o. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. H. Rohrer,
o. Prof. Hofrat Dr. phil. Dr. techn. e. h. K. Ledersteger und
Hofrat Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Mitter

Nr. 2

Baden bei Wien, Ende April 1968

56. Jg.

Bedeutung und Entwicklung der absoluten Schwerebestimmung

von *Karl Reicheneder*, Potsdam*

1. Einleitung

Mit der Einführung des Sterneck'schen Pendelapparats in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts hatten die relativen Pendelmessungen einen sehr starken Auftrieb erfahren, woran das Militärgeographische Institut in Wien großen Anteil hatte. Es war daher naheliegend, daß Helmert 1900 in seinem „Bericht über die relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten“ [1] alle bis dahin auf der ganzen Erde ermittelten Schwerewerte (etwa 1400 Stationen) auf das sog. Wiener System, d. h. auf einen Punkt im Militärgeographischen Institut bezog, der auf den Absolutmessungen durch von Orff 1877 in der Sternwarte München und durch von Oppolzer 1884 in der Sternwarte Wien fußte. Bereits in diesem Bericht [1, S. 374] hatte Helmert aus Vergleichen mit anderen Absolutbestimmungen der Schwerkraft, so mit den Besselschen Fadenpendelbeobachtungen, aber auch schon mit einem vorläufigen Ergebnis (981,270 Gal) der damals in Potsdam angelaufenen Reversionspendelmessungen von Kühnen und Furtwängler vermutet, daß das Wiener System zu hoch liegt. Der Unterschied gegenüber dem jetzt eingebürgerten Potsdamer System beträgt 16 mGal.

Wir wissen heute aus den modernen Absolutbestimmungen der Schwere in zahlreichen Laboratorien, daß der Potsdamer Bezugswert selbst noch um weitere 14 mGal zu hoch ist. Dabei ist interessant, daß die Beobachtungen von Kühnen und Furtwängler den heute als richtig erkannten Wert 981,260 Gal ergeben hätten,

*) vorgetragen am 6. 12. 1967 in Graz und am 7. 12. 1967 in Wien.

wenn diese in ihrer Endausgleichung die theoretisch abgeleiteten elastischen Einflüsse von Schneide und Lager nicht einbezogen hätten [2], [3, S. 66]. Fast möchte man glauben, daß sie diesem Wert, der im Wiener System 30 mGal zu tief lag, zu wenig Vertrauen schenkten und nach einem vermeintlichen Fehler in ihren Messungen suchten. Psychologisch wäre das zu verstehen.

Sicher waren auch die Messungen von Orff [14] und Oppolzer mit größter Sorgfalt und unter Berücksichtigung aller bis dahin bekannten Fehlereinflüsse durchgeführt worden, wahrscheinlich waren auch die relativen Verbindungsmessungen um 1900 nicht so genau, daß der daraus abgeleitete damalige Potsdamer Schwerewert 981,290 Gal auf ± 1 mGal sicher gewesen wäre, wie Borrás [4, S. 3] glaubte, aber nichtsdestoweniger erscheint es heute beinahe unverständlich, wie es zu diesem fast 30 mGal zu hohen Wert kommen konnte. Die Schwierigkeit von absoluten Schweremessungen wird darin deutlich. Nicht nur die Beobachtungsgenauigkeit war damals wesentlich geringer als heute, auch manche Fehlerquellen wurden bei den älteren Messungen noch nicht erkannt. Bei den Messungen von Kater war sogar der Luftdruck unberücksichtigt geblieben, weshalb sie heute wertlos sind. Erwähnt sei auch der Einfluß der Biegung der Stange beim schwingenden Pendel, den zuerst Helmert berechnet hat.

Bei neuen Messungen wurden die früher gesammelten Erfahrungen berücksichtigt, die Geräte und Verfahren zur Schweremessung verbessert. Die technischen Fortschritte in den letzten Jahrzehnten haben es insbesondere möglich gemacht, den freien Fall zu einer Präzisionsbestimmung der Fallbeschleunigung auszunutzen, so daß heute die Genauigkeit einer absoluten Schweremessung etwa mit ± 1 mGal angegeben werden kann. Darunter liegenden Fehlerangaben wird noch skeptisch begegnet, da es sich oft nur um eine innere Genauigkeit handelt.

Ein zuverlässiges Urteil kann man erst gewinnen, wenn am gleichen Ort mit verschiedenen Apparaten, am besten Pendel- und Fallgeräten beobachtet wird, wie es zum ersten Male in Leningrad geschehen ist, wo zwei im Prinzip verschiedene Fallmethoden und das Reversionspendelverfahren nebeneinander angewandt wurden. Die Bestrebungen bei der absoluten Schwerebestimmung gehen daher dahin, die an einer Stelle entwickelte Apparatur auch an anderen Absolutstationen einzusetzen.

2. Zweck der Absolutmessungen

Mancher wird fragen, warum werden so schwierige Absolutbestimmungen der Schwere durchgeführt, wozu ihre Ergebnisse gebraucht? Ihre praktische Bedeutung liegt teils im metrologischen, teils im geodätisch-geophysikalischen Bereich.

Bei allen Maßeinheiten, welche auf einer Gewichtsbestimmung beruhen (alte Ampère-Definition) oder welche sich aus einem allgemeinen Kraftbegriff ableiten lassen, geht die Erdbeschleunigung g ein. Die höchsten Anforderungen an die Kraftdefinition stellt die Druckmessung: wenn beispielsweise der Siedepunkt des Wassers auf 10^{-4} °C festgelegt werden soll, muß der Luftdruck und damit auch g mit einer Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-6}$ bekannt sein [6, S. 84]. Hier liegt auch der Grund, weshalb Absolutbestimmungen der Schwere vielfach in staatlichen Instituten für Maß u. Gewicht durchgeführt wurden, wie im Bureau International des Poids et

Mésures (BIPM) in Sèvres bei Paris, im National Physical Laboratory (NPL) in Teddington, im Mendeljeev-Institut in Leningrad u. a.

Für die Belange der Geodäsie und Geophysik spielt das Schwerfeld der Erde eine sehr wichtige Rolle. Ausgehend von Bezugspunkten mit bekannter Schwere können durch relative Messungen mit Pendelapparaten oder Gravimetern weite Gebiete gravimetrisch aufgenommen werden. Wie die Vergangenheit gelehrt hat, genügt es nicht, diese Bezugspunkte selbst durch relative Messungen zu verbinden. Sie müssen durch Absolutmessungen an mehreren Stellen gegenseitig kontrolliert und abgesichert werden. Nur durch verstärkten Einsatz bei den Absolutmessungen der Schwerkraft läßt sich deren Genauigkeit erhöhen und das Dilemma allmählich überwinden, daß die Schwereunterschiede in einem gravimetrischen Netz mit 10- bis 100-facher Genauigkeit gemessen werden können.

Der mittlere Schwerewert über die ganze Erdoberfläche könnte zur Bestimmung der dynamischen Konstante des Sonnensystems herangezogen werden. Freilich läßt sich die geozentrische Gravitationskonstante k^2M und damit die Äquatorschwere in der Schwereformel heutzutage viel genauer aus Satellitenbeobachtungen gewinnen als aus Schweremessungen.

Die genaue Kenntnis der Schwerkraft auf der Erde schließt das Studium etwaiger Veränderungen mit ein. Dabei sei hier nicht an die durch Sonne und Mond verursachten periodischen Veränderungen, die sog. Erdzeiten gedacht, sondern an Veränderungen in längeren Zeiträumen, an die sog. säkularen Schwereänderungen. Gewiß, man kann auf geologisch ausgesuchten Linien durch Gravimetermessungen relative Schwereänderungen feststellen. Man kann auch versuchen, durch wiederholte Messungen der Schweredifferenz von geeigneten Punkten in einem Schwerenetz längs des Äquators die aus der Westbewegung von Massen im Erdkern folgenden Schwereänderungen nachzuweisen, welche Barta auf Grund der säkularen Wanderung des Magnetpols von etwa $0,2$ pro Jahr ableitet. Zuverlässige Aussagen über die säkularen Änderungen der Schwerkraft, die auch durch eine Änderung der Gravitationskonstante verursacht sein können, erhält man nur durch eine wiederholte Absolutbestimmung der Schwerebeschleunigung am gleichen Ort. Die heutige Genauigkeit der üblichen Meßmethoden reicht dazu allerdings noch nicht aus. Wegen der praktisch und wissenschaftlich sehr interessanten Frage, ob und wie sich die Schwerkraft in größeren Zeiträumen ändert, wird aber den Absolutbestimmungen der Schwere wieder mehr Aufmerksamkeit geschenkt.

3. Allgemeines über Meßmethoden

Hin und wieder wurde von der Absolutbestimmung der Schwere oder der Schwerkraft gesprochen. In unserem Problem ist die Masse unwichtig; man sollte daher besser von der Bestimmung der Schwerebeschleunigung oder auf Empfehlung (DIN 1305) des AEF (Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen) von der Fallbeschleunigung g sprechen, was sich auch immer mehr einbürgert. Da eine Beschleunigung die Dimension cm sec^{-2} hat, erfordert eine Absolutbestimmung von g eine Längenmessung (cm) und eine Zeitmessung (sec). Die Länge L des Sekundenpendels wird als Maß der Schwerebeschleunigung ($g = \pi^2 L$) nicht mehr benutzt.

Als Galilei Ende des 16. Jahrhunderts die Fallgesetze untersuchte, hat er mit seinen Versuchen am schiefen Turm von Pisa auch die erste absolute g -Bestimmung durchgeführt. Im 17. Jahrhundert wurden die ersten Schwerkraftmessungen mit einem Fadenpendel ausgeführt und erst Anfang des 19. Jahrhunderts trat das Reversionspendel in Erscheinung. Wie bereits erwähnt, hat die Methode des freien Falls erst seit zwanzig Jahren für die g -Bestimmung praktische Bedeutung erlangt. Der Vorschlag, den Wert von g aus der Neigung einer rotierenden Flüssigkeit zu bestimmen, bzw. von Quecksilber in einem rotierenden Gefäß [7, S. 47–49] hat kaum Aussicht auf Erfolg. Nach den 1965 in Paris vorgelegten Landesberichten waren in den USA auch Versuche mit fallenden geladenen Teilchen im Gange [31, S. 40].

Bei allen Schwerkraftmessungen vor 1800 hat man es nur mit Absolutbestimmungen zu tun, weil die zu messende Größe g durch eine Längen- und eine Schwingungsdauerbeobachtung auf die Grundeinheiten cm und sec zurückgeführt wurde. Erst Kater hat mehrere Schwerkraftdifferenzen mit einem (Reversions-)Pendel gemessen, dessen Länge er als konstant voraussetzte, und damit den Begriff der relativen Schwerkraftmessung ins Leben gerufen, welche durch den einfacheren Sterneck'schen Apparat und die späteren Vier-Pendelgeräte große praktische Bedeutung erlangt haben.

4. Fadenpendelbeobachtungen

Das Fadenpendel als Repräsentant eines mathematischen Pendels stellt das einfachste Pendelgerät zur absoluten g -Bestimmung dar. Aus der beobachteten Schwingungsdauer T und der Pendellänge l ergibt sich

$$g = \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 l \quad \dots (1)$$

Der heutigen Genauigkeitsforderung konnten die älteren Messungen nicht genügen. Immerhin verdient der in Verbindung mit der französischen Gradmessung entstandene Pendelapparat von Borda und Cassini Erwähnung [5; S. 330].

Einen gewissen Fortschritt brachte die 1828 von Bessel [8], [5; S. 334] zuerst angewandte Differenzmethode. Dabei werden Beobachtungen mit zwei Pendeln verschiedener Länge, aber unter sonst genau gleichen Bedingungen angestellt und dadurch die Einflüsse der Einspannung des Aufhängefadens und der Inhomogenität der als Pendelgewicht dienenden Kugel ausgeschaltet.

Aus den beiden Schwingungsdauern T_1 , T_2 und der sehr genau zu messenden Differenz $l_1 - l_2$ der beiden Pendellängen folgt

$$g = \pi^2 \frac{l_1 - l_2}{T_1^2 - T_2^2} \quad \dots (2)$$

Neben den bekannten Besselschen Fadenpendelmessungen (Berlin, Königsberg, Göttingen) und den Beobachtungen von Pisati und Pucci 1880 in der Ingenieurschule Rom [9] mit einem ähnlichen Apparat sollen die Messungen von Ivanoff

in Leningrad nicht vergessen sein, bei denen Pendel von 21,5 m und 35 m in einem 80 cm weiten Rohr untergebracht waren, das vom Dach bis in den Keller des Mendelejeev-Instituts montiert war. Die Versuche hatten 1906 begonnen und wurden nach längerer Pause 1933 wieder aufgenommen. Es sind vorläufige Ergebnisse bekannt, die Ivanoff 1936 auf der Generalversammlung der IUGG in Edinburg mitgeteilt hat [10].

Bei den neuesten Fadenpendelmessungen in Finnland ist der Einfluß des Luftdrucks weitgehend ausgeschaltet, da sich die Pendel von 8 m bzw. 4 m Länge in einem evakuierten Plastikrohr befinden. Wie aus dem 1965 in Paris und 1967 in Luzern vorgelegten Berichten von Hytönen hervorgeht, wird die Differenz (4 m) der Pendellängen nach dem Väisäläverfahren interferometrisch gemessen. Geplant sind g -Bestimmungen mit einem 200 m langen Fadenpendel [11].

5. Verfahren mit starrem Pendel ohne Reversion

Der französische Physiker de Prony hat 1792 als erster vorgeschlagen, statt des Fadenpendels ein starres, sog. physisches Pendel für die Schwermessung zu benutzen. Bekanntlich hat dieses die gleiche Schwingungsdauer wie ein mathematisches Pendel von der Länge

$$l = \frac{J}{M \cdot s} \quad \dots (3)$$

wo s den Abstand seines Schwerpunkts von der Drehachse, J sein Trägheitsmoment um diese Achse und M seine Masse bezeichnen. Um die schwer zu ermittelnden Größen in der obigen sog. reduzierten Pendellänge l eliminieren zu können, sind mehrere Vorschläge gemacht worden, welche eine Reversion des Pendels vermeiden:

Prony selbst wollte die Schwingungsdauer um 3 parallele im Pendel feste Schneiden beobachten, der österreichische Professor Finger eine Zusatzmasse ober- und unterhalb der Achse so anbringen, daß die Schwingungsdauern in beiden Fällen gleich werden [13].

Aus neuerer Zeit erinnert daran das von Toropin [12] vorgeschlagene Differentialpendel bei dem auch nur eine Schneide immer auf dem gleichen Lager schwingt, aber eine bekannte Masse an drei wohl definierte Stellen im Pendel gebracht werden muß und die jeweiligen Schwingungsdauern beobachtet und abgestimmt werden. Alle diese Vorschläge sind praktisch nicht verwirklicht worden.

6. Das Reversionspendel

Wie schon Huygens nachgewiesen hat, gibt es zu jedem Drehpunkt eines physischen Pendels einen zweiten, im Abstand l darunter gelegenen Punkt, den sogenannten Schwingungsmittelpunkt, um den das umgedrehte Pendel mit der gleichen Periode schwingt. Auf Grund dieser Tatsache hat Bohnenberger 1811 das Reversionspendel vorgeschlagen, das unabhängig davon 1817 von Kater zuerst gebaut wurde [5, S. 332]. Absolute Gleichheit der beiden Schwingungsdauern ist kaum zu erreichen und auch nicht notwendig; denn, wie Bessel nachgewiesen hat, kann man aus den beobachteten Schwingungsdauern T_1 und T_2 die Schwingungsdauer

$$T^2 = \frac{s_2 T_2^2 - s_1 T_1^2}{s_2 - s_1} \quad \dots (4)$$

gewinnen, welche einem Pendel entspricht, dessen reduzierte Pendellänge l genau dem Schneidenabstand $s_1 + s_2$ gleich ist. s_1 und s_2 sind dabei die Schwerpunktabstände in beiden Lagen des Pendels. Nach obiger Gleichung kann T nur bestimmt werden, wenn s_1 und s_2 sehr verschieden sind; bei den üblichen Reversionspendeln ist $s_2/s_1 \approx 2$. Die dadurch bedingte Unsymmetrie des Pendels wirkt sich wegen des Einflusses der umgebenden Luft nicht günstig aus; man kann ihr begegnen und für die Gewichte an den Enden der Pendelstange Massen von gleicher äußerer Form aber verschiedener Dichte, bzw. Hohlkörper verwenden.

7. Absolutmessungen im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts

Die Blütezeit, welche die Schweremessung in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts erfahren hat, ist zweifellos auf die internationale Zusammenarbeit in der neu gegründeten Europäischen Gradmessung zurückzuführen. Damals hat der nach Bessels Angaben von Repsold, Hamburg, gebaute Reversionspendelapparat [5; S. 338] weite Verbreitung gefunden und war das Gerät für absolute und auch relative Schweremessungen, bevor es für den letzten Zweck von dem bequemeren und stabileren Sterneckschen Apparat verdrängt wurde.

Schon Bessel hatte umfangreiche theoretische Untersuchungen über das Pendel angestellt; er hatte sich auch mit dem Einfluß der umgebenden Luft und dem Abrollen der Schneiden befaßt, und gezeigt, daß letzterer zum größten Teil im Mittelwert

$$\frac{T^2 + \bar{T}^2}{2} \quad \dots (5)$$

herausfällt, wenn T und \bar{T} die nach Formel (4) berechneten Schwingungsdauern vor und nach der Schneidenvertauschung bezeichnen. Jetzt beschäftigte man sich hauptsächlich mit dem Einfluß, der durch das Mitschwingen des Pendelstativs entsteht. Um ihn zu eliminieren, hat Faye bereits 1877 gegeneinander schwingende Pendel vorgeschlagen, Cellerier die Messungen mit gleich langen Pendeln von verschiedenem Gewicht. Oppolzer [15, S. 11] glaubt auf diese Weise auch elastische Schneide-Lager-Effekte eliminieren zu können. Barraquer fand ein geringeres Mitschwingen bei Achatschneiden als bei Stahlschneiden [15, S. 17 u.] und führt es auf ein Gleiten der Schneide zurück. Leider wurden bei den Absolutbestimmungen in Madrid und an anderen Orten Spaniens [16] mit zwei verschieden großen Repsoldapparaten und je einem leichten und schweren Pendel von 1 m und 56 cm Schneidenabstand die obere und untere Schneide noch nicht systematisch vertauscht, weshalb bei diesen sehr umfangreichen und sorgfältigen Beobachtungen der erhebliche Einfluß des Abrollens der Schneide nicht eliminiert ist. Der 1883 in Rom vorgelegte Bericht von Oppolzer [15] und noch mehr der von Helmholtz 1887 auf der Konferenz der

Permanente Kommission der Internationalen Erdmessung in Nizza vorgelegte „Bericht über die in den letzten Jahren ausgeführten Pendelmessungen“ [17, Anhang II] lassen das damalige Interesse an Absolutbestimmungen der Schwere und ihren Umfang erkennen. Auf der gleichen Sitzung [17, Anhang Vc] entwickelte Defforges seine Gedanken, das Mitschwingen des Stativs und das Gleiten der Schneide auf dem Lager durch Verwendung von gleich schweren Pendeln verschiedener Länge, aber von gleichem Verhältnis der Schwerpunktabstände zu eliminieren, was formelmäßig auf die Bessel'sche Gleichung (2) hinausläuft. Er ließ von Brunner, Paris, ein Gerät mit zwei Pendeln (1 m und 0,5 m) bauen, bei dem zum ersten Male auch ein Vakuumzylinder vorgesehen war. Damit hat Defforges 1892 die erste g -Bestimmung im BIPM in Sèvres bei Paris durchgeführt [18] und auch an anderen Orten in Frankreich.

8. Die Grundlage des Potsdamer Schweresystems

Die größte Bedeutung hat die Absolutbestimmung der Schwere von Kühnen und Furtwängler mit fünf Repsoldpendeln im Geodätischen Institut Potsdam erlangt [19]; denn auf ihr ist das heutige internationale Schweresystem gegründet. Eingehende theoretische Untersuchungen, unter denen der Einfluß der Elastizität der Pendel und das Schneide-Lager-Verhalten einen breiten Raum einnehmen, waren vorher von Helmert angestellt worden, der auch über die Vorversuche berichtete [20]. Unter den Pendeln befanden sich das leichte und das schwere Sekundenpendel des Militärgeographischen Instituts Wien (Oppolzer) und das vom Astronomischen Institut in Padua (Lorenzoni) ausgeliehene 1 m-Pendel, sowie ein 1892 vom Geodätischen Institut Potsdam angeschafftes $\frac{1}{2}$ -sek. Pendel. Eine gemeinsame Stativplatte wurde gebaut; sie trug auch den Vakuumzylinder. Alle vorhandenen Schneiden wurden, soweit technisch möglich, ausgetauscht und zum ersten Male wurde auch mit ebenen Flächen in den Pendeln auf feststehenden Schneiden gemessen. Obwohl die Beobachtungen mit der größten Sorgfalt und unter Berücksichtigung aller Fehler einflüsse durchgeführt worden sind, hat die Ableitung des Ergebnisses, wie schon eingangs erwähnt, zu dem um 14 mGal zu hohen Potsdamer Wert geführt. Berroth [2] hält den Ausgleichungsansatz für nicht gerechtfertigt, da der ziemlich große Einfluß des Abrollens der Schneiden durch die Anlage der Messungen bereits eliminiert ist. Bis auf Glieder höherer Ordnung trifft das im Mittelwert (5) zu; diese zu berücksichtigen hat aber erst dann Sinn, wenn bei der Betrachtung des geometrischen Abrollvorgangs selbst Glieder höherer Ordnung nicht vernachlässigt werden. Durch Gleit- und rein elastische Effekte ist der Fehler von 14 mGal kaum zu deuten, der eigentlich nur durch das unerklärliche Herausfallen der mit dem Halbsekundenpendel auf fester Schneide durchgeführten Meßreihe entstanden ist.

Das Auswechseln von festen Schneiden, auf deren Maße (Schneidenhöhe) es nicht ankommt, ist sicher einfacher als die Vertauschung der beiden Schneiden im Pendel. Dadurch etwa entstehende kleine Änderungen der Massenverteilung sind an dieser Stelle des Pendels ungefährlich, was von kleinen Verrückungen eines Pendels auf fester Schneide nicht behauptet werden kann. Andererseits ist die interferentielle Messung des Abstandes zweier Flächen im Pendel genauer durchzuführen

als die Messung des Schneidenabstands. Der Vorteil von festen Schneiden wird aber meistens überschätzt, da auch in diesem Falle der Kontrolle wegen die Messung mit mindestens einer zweiten Schneide wiederholt werden muß. Das Mittel fußt dann auf den gleichen Einzeloperationen wie bei einer Messung mit beweglichen Schneiden nach deren Vertauschung.

Offenbar glaubte man, daß mit den an Sorgfalt und Umsicht zweifellos einmaligen Beobachtungen von Kühnen und Furtwängler Anfang des Jahrhunderts ein gewisser Abschluß erreicht sei; denn es ist dann um die absolute Schwerebestimmung sehr still geworden. Mit dem 1910 erschienenen Schwerekatalog von Borrás [4] hat sich allmählich auch der Potsdamer Schwerewert 981,274 Gal als internationaler Bezugswert eingebürgert.

9. Reversionspendelmessungen im 20. Jahrhundert

Erst 1935 haben Heyl und Cook [21], [5; S. 355] im Bureau of Standards, Washington, eine g -Bestimmung mit drei Reversionspendeln aus 1,6 m langen Quarzrohren mit einem äußeren Durchmesser zwischen 4,5 und 7 cm durchgeführt, in denen in 1 m Abstand zwei Lager eingesetzt werden konnten. Die Schneide war am Stativ befestigt. Die inzwischen fortgeschrittene Vakuumtechnik erlaubte die Beobachtungen bei etwa 0,1 mb durchzuführen und dadurch die Genauigkeit zu erhöhen. Mehrere Kombinationen von Schneide- (Quarz, Achat, Stahl, Stellite = Kobalt-Chrom-Wolframlegierung) und Lagermaterial (Quarz, Stellite) wurden verwendet und merkbare Unterschiede in g gefunden. Durch Verwendung von Quarz als Pendelmaterial wird zwar der Temperatureinfluß herabgesetzt, wegen seiner geringen Dichte der Einfluß des Luftdrucks aber vergrößert; außerdem muß bei Quarzpendeln dem Einfluß elektrostatischer Aufladung Rechnung getragen werden. Mit der gleichen Apparatur wurde 25 Jahre später in Buenos Aires beobachtet.

Die Ergebnisse von Heyl und Cook ließen die ersten Zweifel am Potsdamer Schwerewert aufkommen und gaben das Signal zu weiteren Messungen. Der Verdacht wurde 1939 durch die Beobachtungen von Clark [22], [5; S. 356] im National Physical Laboratory in Teddington bestätigt. Er benutzte ein 1m-Pendel mit Doppel-T-Querschnitt aus einer nichtmagnetischen Legierung und eine feste Schneide. Der Lagerabstand im Pendel wurde zum ersten Male interferometrisch bestimmt; denn bisher diente zur Längenmessung immer ein Vergleichsmaßstab. Bei dem erreichten Vakuum von 10^{-5} mb war nach Clark's Untersuchungen eine Luftdruck-Korrektur nicht mehr nötig. Er hat auch den Krümmungsradius der Schneide gemessen und eine empirische Formel für seinen Einfluß auf die Schwingungsdauer angegeben.

1956 wurden die durch den Krieg unterbrochenen Arbeiten von Agaletzki, Jegorow und Marzinjak im Mendelejew Institut, Leningrad, zur Absolutbestimmung von g nach drei verschiedenen Verfahren abgeschlossen, darunter [23, S. 9–38] auch Beobachtungen mit drei gleich schweren (4,6 kg), aber verschieden langen (40, 60 und 75 cm) Reversionspendeln aus geschmolzenem Quarz von Doppel-T-Querschnitt. Daran waren Platten aus Pyrex-Glas mit den tragenden Flächen angesetzt und am schweren Ende Messingblöcke. Die Stahlschneiden waren am Stativ

befestigt. Der Vakuumzylinder erlaubte Messungen im Luftdruckbereich 0,1 bis 0,4 mb. Aus je zwei Pendeln wurde ein von systematischen (Mitschwingen, Schneide-Lager-Effekte) Fehlern befreiter g -Wert nach der Formel

$$g = \frac{l_1 g_1 - l_2 g_2}{l_1 - l_2} = g_1 + l_2 \frac{g_1 - g_2}{l_1 - l_2} \quad \dots (6)$$

abgeleitet, welche auf der Annahme $\Delta g = g \Delta l / l$ fußt und bis auf Glieder höherer Ordnung in $(g_1 - g_2)$ mit der Besselformel (2) übereinstimmt. Sie bestätigte sich bei Untersuchungen über das Mitschwingen, als unter die feste Schneide am Stativ eine Gummischicht gelegt wurde.

Der nach (6) oder nach der Bessel-Formel (2) errechnete Schwerewert g liegt nie zwischen den Werten g_1 und g_2 , welche mit den Einzelpendeln erhalten werden, ist also immer das Ergebnis einer Extrapolation. Wenn daher irgendwelche Ursachen, z. B. Bodenbewegungen die Einzelpendel verschieden beeinflussen oder die mittleren Fehler der Einzelpendel ebenso groß sind wie der zu eliminierende systematische Fehler, diesen vielleicht sogar übersteigen, dann ist der Vorteil solcher Eliminationsverfahren recht fragwürdig. Durch das Gegeneinanderschwingen zweier Pendel, wie es Faye 1877 vorgeschlagen hatte, kann nicht nur das Mitschwingen weitgehend ausgeschaltet, sondern auch der Einfluß von Bodenbewegungen verringert werden. Die jahrzehntelangen Erfahrungen mit Zwei- oder Vierpendelgeräten für die relative Schweremessung haben jedenfalls gezeigt, daß das Periodenmittel aus zwei gegeneinanderschwingenden Pendeln viel genauer ist, als nach den Fehlern der Einzelpendel zu erwarten wäre.

Diese und die weitere Erfahrung, daß sich die Schwingungsdauer eines Pendels kaum ändert solange es im evakuierten Apparat verbleibt, veranlaßten mich 1954, für die neue Absolutbestimmung der Schwere in Potsdam zwei auf gemeinsamem Stativ gegeneinander schwingende Reversionspendel zu benutzen und ihre Reversion durch Umdrehen des ganzen Apparates zu bewerkstelligen — s. Abb. 1. Dazu muß das Stativ zwei obere und zwei untere Lager besitzen, auf welche die im Pendel festen Schneiden jeweils aufgesetzt werden können. Der Abstand der beiden in einem Pendel vorgesehenen Hilfsebenen sowie zwischen diesen und der jeweils gegenüberliegenden Lagerfläche wird interferometrisch mit einem Quarzetalon im evakuierten Apparat verglichen, wobei das Pendel auf dem Lager hängt. Aus diesen drei Längen läßt sich der Schneidenabstand ableiten.

Die genaue Abstimmung, welche bei gegeneinander schwingenden Pendeln notwendig ist, bringt für Reversionspendel die Schwierigkeit mit sich, daß auch die Schneidenabstände in beiden Pendeln mit hoher Genauigkeit gleich sein müssen. Temperatureinflüsse bleiben von geringer Bedeutung, wenn die Längenmessung im Apparat unmittelbar vor und hinter der Schwingungsdauerbeobachtung erledigt werden kann. Ursprünglich war vorgesehen, drei verschieden große Apparate dieser Art zu bauen, bei denen entsprechend der 1956 in Paris ausgearbeiteten Empfehlung

Nr. 10 [24]*) Lager und Schneiden aus verschiedenem Material eingesetzt werden können. Nach Fertigstellung des ersten Geräts mit Messingpendeln von 25 cm-Schneidenabstand wurde 1961 zur Beschleunigung der Arbeiten noch ein größerer Apparat mit einer am Stativ festen Schneide in Angriff genommen. Unter Verzicht auf Reversion und Längenmessung im evakuierten Gerät können darin drei Pendelpaare von den Längen 37,5, 50 und 75 cm verwendet werden, welche aus rechteckigen Quarzblöcken zusammengesetzt sind [31; S. 39]. Das Aufsetzen und Entlasten der Schneiden geschieht dabei zum ersten Male mittels Preßluft auf einem Luftkissen.

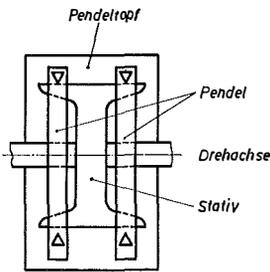


Abb. 1

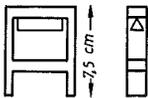


Abb. 2

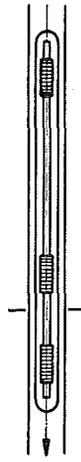


Abb. 3

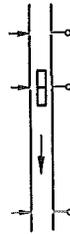


Abb. 4

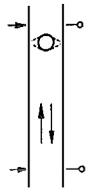


Abb. 5

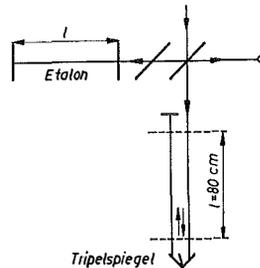


Abb. 6

Die Arbeiten in Potsdam sind weit fortgeschritten, aber noch nicht abgeschlossen. Das gleiche gilt für die 1956 von Thompson begonnene und von Moran in Fitchburg (Mass., USA) fortgesetzte Entwicklung nach ähnlichen Grundgedanken. Die beiden rahmenähnlichen Reversionspendel aus Quarz (Abb. 2) haben einen Lagerabstand von nur 7,5 cm und schwingen im Vakuum auf festen Saphirschnei-

*) „Die Internationale Gravimetrische Kommission empfiehlt, daß Absolutmessungen nach verschiedenen Methoden an möglichst vielen Stellen ausgeführt werden, insbesondere, daß bei Reversionspendelmessungen die Parameter wie Masse und Länge der Pendel, Material von Pendel, Schneide und Lager variiert werden, um systematische Fehler auszuschalten.“

den gegeneinander. Ihre Länge wird interferometrisch im Pendelapparat direkt in Lichtwellenlängen ausgemessen. Es handelt sich um ein transportables Gerät, das nach dem in Luzern 1967 vorgelegten US-Nationalreport (S. 352) demnächst auf der Schleife Washington-Teddington-Paris eingesetzt werden soll.

Aus einem anderen 1965 in Paris vorgelegten Bericht erfährt man, daß die Absolutbestimmung in der Universität Buenos Aires mit einem Reversionspendel aus einem etwa 67 mm starken Quarzrohr wiederholt wird.

10. Der freie Fall

Bekanntlich ist der in der Zeit t nach Beginn des Falls zurückgelegte Weg eines im Vakuum frei fallenden Körpers

$$s = \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots (7)$$

Um hieraus g mit einer Genauigkeit von 10^{-6} ermitteln zu können, müssen an die Kurzzeitmessung, insbesondere an die exakte Erfassung des Beginns und des Endes von Fallweg und Fallzeit hohe Anforderungen gestellt werden. Diese Schwierigkeit umgeht man und markiert die Zeiten, wann der Körper durch drei horizontale Ebenen von bekanntem, passend gewähltem Abstand fällt. Bei größerer Zahl der erfaßten Durchgänge spricht man vom Mehrpunkte-Fall. Die Durchgänge erfolgen mit immer größerer Geschwindigkeit und können daher nicht mit der gleichen Genauigkeit erfaßt werden. Aus diesem Grunde hat Volet bereits 1947 den sog. symmetrischen Fall vorgeschlagen: Der Körper wird hochgeschleudert, passiert in den Zeitpunkten t_1, t_2 zwei Ebenen und fällt dann zur Zeit t_3, t_4 durch die gleichen Ebenen mit derselben Geschwindigkeit wie bei der Aufwärtsbewegung; die Differenzen $t_4 - t_1$ und $t_3 - t_2$ werden gemessen, ebenso der Abstand H beider Ebenen. Dann ist

$$g = \frac{8 H}{(t_4 - t_1)^2 - (t_3 - t_2)^2} \quad \dots (8)$$

Beim symmetrischen Fall ist der Luftwiderstand weitgehend ausgeschaltet, der sonst bei Fallexperimenten, vom sog. gemischten Fall abgesehen, die größte Rolle spielt, und zwar um so mehr, je größer die Fallstrecke und damit die Geschwindigkeit des fallenden Körpers ist. Fällt dieser in engen Röhren, so ist neben den üblichen Strömungsgesetzen auch ein gewisser Kolbeneffekt zu beachten.

Während das Pendel einen Mittelwert der Schwingungsdauer über die ganze Beobachtungszeit liefert, der von kurz dauernden Störungen am Beobachtungsort nur wenig beeinflusst wird, treten diese beim freien Fall, wo man es mehr mit Momentanwerten zu tun hat, in voller Größe in Erscheinung. Daher muß bei Fallexperimenten die Seismik sehr genau verfolgt werden. Auch die Inhomogenität des Schwerfeldes kann im Gegensatz zu den Pendelmessungen dabei nicht unberücksichtigt bleiben.

11. Beobachtungen mit frei fallenden Maßstäben

Bei Fallversuchen mit Stäben muß sehr darauf geachtet werden, daß die abzubildenden Teilstriche und Strichmarken genau horizontal liegen und der Stab vor der Auslösung absolut ruhig hängt, so daß keine zusätzlichen Drehmomente den reinen Fall stören.

Obwohl Guillet schon 1917 vorgeschlagen hatte, den freien Fall bei der g -Bestimmung anzuwenden, wurde der erste Versuch erst in der Mitte dieses Jahrhunderts von Volet [25] im IBPM in Sèvres mit zwei 1,25 m langen Maßstäben aus Invar bzw. Phosphorbronze durchgeführt. Der in Luft von einigen mm Hg fallende mit einer mm-Teilung versehene Maßstab wurde zusammen mit Strichen auf einer festen Glasplatte 25 Mal während eines Falles fotografiert, wobei zur Auslösung ein quarzgesteuertes Blitzgerät benutzt wurde. Volet befürchtete eine Bremsung des Stabes im Magnetfeld der Erde. Daher hat 10 Jahre später Thulin [26] an gleicher Stelle mit einem Platin-Iridiumstab von X-Querschnitt die Absolutbestimmung im Vakuum und unter verbesserten Bedingungen wiederholt.

Schon vorher war auch die g -Bestimmung von Agaletzki, Jegorow und Marzinjak in Leningrad abgeschlossen worden. Sie benutzten zu ihrem freien Fall-Experiment [23, S. 63–86] einen 1,05 m langen Messingkörper mit beiderseitig aufgeklebten Quarzstäben, auf deren Oberfläche eine fotografische Emulsion aufgebracht war. Während seines Falls im Vakuum von etwa 0,2 mb wurde mittels eines quarzgesteuerten Strobotron eine feste Strichmarke in kurzen, gleichen Zeitabständen (125 oder 250 Hertz) auf die lichtempfindliche Schicht gebracht. Diese Marken auf dem Stab spiegeln das Fallgesetz wider und werden ausgemessen. Nach dem gleichen Prinzip arbeitet man in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, wo ein 2 m langes Quarzrohr von 75 mm äußerem Durchmesser mit beiderseitig aufgetragener Fotoemulsion benutzt wird [31, S. 39].

Bei dem Fallexperiment von Preston-Thomas u. a. [27] in Ottawa (National Research Council) ist ein 2 m langer Stahlstab von nur 2 cm²-U-Querschnitt mit aufgeklebten kurzen Skalen zum Schutz gegen Temperaturstrahlung in eine Duraluminiumröhre von 5 cm Durchmesser fest montiert — s. Abb. 3. Der ganze 7 kg schwere Körper fiel innerhalb einer wasserumspülten Kammer bei einem Innendruck von etwa 0,1 mb. Selbst bei diesem niederen Druck erreicht der Einfluß des Luftwiderstands bei der beachtlichen Fallhöhe von 2 m fast 0,6 mGal und ist wegen des komplizierten Fallkörpers ziemlich unsicher. Der Abstand der Skalen war so bemessen, daß diese bei dem alle 0,1 sec einsetzenden Lichtblitz gerade durch die feste Lichtschranke fielen und zusammen mit festen Strichmarken fotografiert werden konnten. Die mit zwei verschiedenen Stäben und Blitzlampen erhaltenen Ergebnisse zeigten einen systematischen Unterschied von 1,5 mGal.

Die g -Bestimmung in Tokio (National Research Laboratory of Metrology) wurde 1956 von Sakuma in Itabashi begonnen und 1963 wegen der besseren Seismik in Kakioka von Senda, Inouye und Ando fortgesetzt [31, S. 41]. Es wurde zuerst der Fall eines 1 m langen Invarstabes von H -Querschnitt in einem Vakuumzylinder, später eines Quarzstabes beobachtet; beide waren mit einer geeichten cm-Teilung versehen. Der Stab wird in der Beobachtungshöhe beleuchtet und auf den Schlitz

vor einer Photozelle abgebildet. Beim Fallen registriert man das von den einzelnen Strichen reflektierte Licht zusammen mit Zeitmarken.

12. Beobachtungen mit kleinen Fallkörpern

Vor 10 Jahren wurde im Deutschen Amt für Meßwesen und Warenprüfung in Berlin ein Versuch geplant, bei dem ein nur etwa 10 cm langer, mit einem Schlitz versehener Stab 1 m frei fällt und dabei drei Lichtschranken passiert — s. Abb. 4. Aus deren Abstand und den registrierten Zeiten des Durchgangs läßt sich die Fallbeschleunigung berechnen.

Cook hat 1965 eine neue g -Bestimmung in Teddington (National Physical Laboratory) abgeschlossen [33, S. 5/6], bei der ein Glasball hochgeschleudert wird — s. Abb. 5. Er passiert während des Steigens und Fallens zwei horizontale Ebenen, die durch Schlitze in Quarzglasblöcken sehr genau definiert sind. Der Glasball wirkt gleichzeitig als Linse und bildet [6, S. 101] die Schlitze vor der Lichtquelle auf jene vor der Photozelle ab.

Inzwischen wurden bereits Versuche mit fallenden Tripelspiegeln unternommen. Bekanntlich werfen diese einen Lichtstrahl auch bei kleinen Richtungsänderungen des Spiegels genau in die Einfallrichtung zurück. Fallkörper mit Tripelspiegeln eignen sich daher bestens zum interferometrischen Vergleich von Längen, bei dem das Auftreten eines Streifensystems mit weißem Mittelstreifen das Merkmal der Gleichheit darstellt. Bei den Fallexperimenten bildet ein Etalon mit festen parallelen Endflächen, deren Abstand bekannt ist, bzw. direkt bestimmt werden kann, den einen Teil eines Interferometers. Der andere Teil ist vertikal zu denken mit einer festen horizontalen Endfläche, während die andere Endfläche durch den Tripelspiegel definiert wird. Nur bei einer bestimmten Fallhöhe wird Längengleichheit der beiden Interferometerteile und ein kurzes Aufleuchten von Interferenzstreifen eintreten, was sich wiederholt, wenn die Fallhöhe genau das Doppelte, Dreifache, usw. beträgt. Diese Helligkeitsschwankung genügt, einen Impuls auszulösen, der zeitlich festgehalten wird. Das Auftreten der Interferenzstreifen tritt an die Stelle der realen Lichtschranken bei den früheren Fallversuchen.

Die ersten Ergebnisse einer g -Bestimmung mit fallendem Tripelspiegel hat Faller [28] auf der Generalversammlung der IUGG 1963 in Berkeley vorgelegt. Er hat in der Princeton Universität (Palmer Physics Laboratory), New Jersey (USA) die an drei Stellen (a , $a + 2h$, $a + 4h$) auftretenden Interferenzstreifen auf einer nur wenige dm betragenden Fallstrecke zeitlich registriert und das Etalon von der Länge $h \approx 5,3$ cm durch Beobachtung Heidingerscher Ringe direkt in Lichtwellenlängen ausgemessen.

Von einer schon länger begonnenen neuen absoluten Bestimmung der Fallbeschleunigung im BIPM in Sèvres hat kürzlich [33, S. I-6/7] Sakuma ein vorläufiges Ergebnis bekanntgegeben. Er schleudert einen ca. 10 cm langen, fast $\frac{1}{2}$ Kilo schweren Körper mit Tripelspiegel hoch [29], der mit dem Vergleichsetalon in einer dem Michelson'schen Interferometer ähnlichen Anordnung liegt (Abb. 6) und beim Steigen und Fallen je zweimal Interferenzstreifen hervorruft. Der Abstand dieser Stellen, bezw. die Länge des Etalons — zur Kontrolle werden deren zwei

benutzt — beträgt 80 cm. Die Einzelbeobachtungen stimmen auf wenige 0,01 mGa überein und lassen sogar den Gezeiteneffekt erkennen. Die Apparatur soll periodisch eingesetzt werden, um eventuelle säkulare Schwereänderungen nachzuweisen. Ein ähnliches Experiment ist nach dem in Luzern vorgelegten Landesbericht von Bell in Sydney (National Standard Laboratory), Australien begonnen worden.

Der Versuch von Rose u. a. [30] in der Universität von Wisconsin (USA) benutzt ebenfalls einen fallenden Tripelspiegel, wobei aber hier das zurückgeworfene Lichtbündel den nächsten Lichtimpuls auslöst. Aus der registrierten Impulsfolge während des Falls und der bekannten Lichtgeschwindigkeit, deren Kenntnis die Genauigkeit begrenzt, kann auf g geschlossen werden.

Wie aus dem 1965 in Paris und 1967 in Luzern vorgelegten Landesberichten Schwedens hervorgeht, ist in Stockholm (Rikets allmänna kartverk) ein Apparat zur g -Bestimmung mit fallenden Kugeln aufgestellt worden. Auf der Tagung der Internationalen Gravimetrischen Kommission [31; S. 36/37] erfuhr man auch, daß Fallner und Hammond bei einem neuen Experiment mit fallendem Interferometer in Boulder (Colorado, USA) die Lasertechnik eingesetzt haben.

13. Der sogenannte gemischte Fall

Es handelt sich dabei um den freien Fall eines Körpers innerhalb einer Kammer, welche ihrerseits in Luft von normalen Druck fällt und dabei an Drähten, die teils zur Zeitmarkierung dienen, geführt wird. Man spricht manchmal auch von „geführten Fall“. Da der frei fallende Körper relativ zur Kammer nur eine geringe Geschwindigkeit hat, spielt der Luftwiderstand hier eine unbedeutende Rolle.

Die Auswertarbeiten sind beim gemischten Fall am umfangreichsten.

Das erste Experiment dieser Art wurde von Agaletski, Egorow und Marzinjak in Leningrad [23, S. 39—62] durchgeführt. Eine 80 cm lange zylindrische Kammer fiel von der 3. Etage des Mendelejev Instituts bis in den Keller, wobei auf die führenden Stahldrähte magnetische Zeitmarken gebracht wurden. Der in der Kammer frei fallende 15 cm lange Messingrahmen mit eingelegter Fotoplatte zur Aufbringung von Zeitmarken legte dabei relativ zur Kammer nur etwa 15 cm zurück.

Über eine ähnliche g -Bestimmung des National Bureau of Standards in der Nähe von Gaithersburg (USA) hat 1965 Tate kurz berichtet [32]. Es wurde die Zunahme der Geschwindigkeit eines frei fallenden 1 m langen Quarzstabs registriert, der in einer selbst fallenden Vakuumkammer frei fiel. Die mit vier verschiedenen Stäben erhaltenen Ergebnisse zeigten keinen systematischen Unterschied.

Bjerhammar, Schweden, berichtet [33; S. 5] von einem neuen Vorhaben mit einem frei fallenden Tripelspiegel in einer in Luft fallenden Vakuumkammer, wobei die Strecken mit Laser gemessen werden.

14. Vergleich von Ergebnissen

Die in diesem Jahrhundert durchgeführten g -Bestimmungen seien nochmals in der Reihenfolge der bekanntgewordenen Ergebnisse aufgeführt und dem Potsdamer Fundamentalwert gegenübergestellt, d. h. es sind in der letzten Spalte der Tabelle,

nur die Abweichungen gegenüber 981 274,0 mGal angegeben. Dabei spielt auch die zugrunde gelegte gravimetrische Verbindung zwischen der Absolutstation und Potsdam eine Rolle. Man kann daher auch etwas abweichende Angaben finden, noch dazu, wo hin und wieder an den Angaben der Autoren nachträglich berechnete Korrekturen angebracht wurden. In der vorletzten Spalte ist die innere Genauigkeit der jeweiligen Absolutbestimmung angeführt:

(*P* Reversionspendel; *f* freier, *s* symmetrischer, *g* gemischter Fall;
M fallender Maßstab, *T* Tripelspiegel, *K* andere kleine Körper)

Jahr	Ort	Methode	Bearbeiter	Genauigkeit	Diff.
1906	Potsdam	5 <i>P</i>	Kühnen u. Furtwängler	± 3,0	0,0
1936	Washington	3 <i>P</i>	Heyl und Cook		- 18,4
1939	Teddington	1 <i>P</i>	Clark		- 12,9
1946	Potsdam	verbessert durch:	Berroth Jeffreys		- 12,7
1952	Sèvres	<i>fM</i>		Volet	
1956	Leningrad	3 <i>P</i> <i>gK</i>	Agaletzki, Egorow u. Marzinjak	± 0,4	- 12,1
	Leningrad	<i>gK</i>	"	± 1,6	- 9,3
	Leningrad	<i>fM</i>	"	± 2,0	- 7,6
1959	Sèvres	<i>fM</i>	Thulin	± 0,7	- 12,8
1960	Ottawa	<i>fM</i>	Preston-Thomas u. a.	± 1,5	- 13,7
1960	Buenos Aires	<i>P</i>	Baglietto	vorl.	- 12
1963	Princeton	<i>fT</i>	Faller	± 0,7	- 15,1
1965	Teddington	<i>sK</i>	Cook	± 0,13	- 13,7
1965	Tokio	<i>fM</i>	(Sakuma), Senda, u. a.	vorl.	- 15,2
1965	Gaithersburg	<i>gM</i>	Tate	± 0,3	- 13,2
1967	Sèvres	<i>sT</i>	Sakuma	vorl. ± 0,1	- 13,8

Literaturverzeichnis

[1] Verhandlungen der 1900 in Paris abgehaltenen 13. Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung; Beilage B IX, Berlin 1901.

[2] Berroth, A.: Das Fundamentalsystem der Schwere im Lichte neuer Reversionspendelmessungen. Bull. Geod. Nr. 12, 1949, S. 183–205.

[3] Reicheneder, K.: Zur Übertragung des Potsdamer Schweresystems. Veröff. d. Geod. Inst. Potsdam Nr. 31, Akad. Verlag, Berlin 1967.

[4] Borrás, E.: Bericht über die relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten in der Zeit von 1808 bis 1909 und über ihre Darstellung im Potsdamer Schweresystem. Verhdlg. d. 16. allg. Conf. d. Int. Erdmessung 1909 in London u. Cambridge, Beilage B X; Berlin 1911.

[5] Jordan-Eggert: Handbuch der Vermessungskunde, III, 2; 8. Aufl. Stuttgart 1941.

[6] Cook, A. H.: The absolute determination of the acceleration due to gravity. Metrologia, I, 1965, S. 84–114.

[7] Cook, A. H.: Recent developments in the absolute measurement of gravity. Bull. Géod. Nr. 44 (1957), S. 34–59.

[8] Bessel, Fr. W.: Untersuchungen über die Länge des einfachen Sekundenpendels. Berlin 1828.

[9] Pisati, G. und Pucci, E.: Sulla lunghezza del pendolo a secondi ricerche di Rom MDCCCLXXX, Rom 1883.

[10] *Ivanoff, A. A.*: Détermination de l'accélération absolue de la pesanteur à l'aide de pendules longs, à l'institut de métrologie de l'U. R. R. S., à Leningrad. Bull. Géod. Nr. 52 (1936), S. 481—492.

[11] *Kukkamäki, T. J.*: Two hundred metre pendulum. Bull. géod. 51 (1959), S. 103.

[12] *Торопин, С. И., Дифференциальный физический маятник с одной системой пружина-подушка. Труды ВНИИМ 23(83) Исследование в области гравиметрических измерений, 1954, Стр. 5—17.*

(*Toropin, S. I.*: Das Physische Differentialpendel mit einer Schneide-Lager-Anordnung. Arb. d. Metrol. Forsch. Inst. 23 (83) Untersuchungen auf dem Gebiet gravimetrischer Messungen. 1954, S. 5—17)

[13] *Finger, J.*: Über ein Analogon des Kater'schen Pendels und dessen Anwendung zu Gravitationsmessungen. Sitz. Ber. Akad. Wien 84, 2. Abt. (1881) S. 168—193.

[14] *Orff, Carl von*: Bestimmung der Länge des einfachen Sekundenpendels auf der Sternwarte zu Bogenhausen. Abhdlg. math. phys. Cl. Bayr. Akad. d. Wiss. XIV, München 1883, S. 161—294.

[15] *Oppolzer, Th. v.*: Bericht über die Bestimmung, der Schwere mit Hilfe verschiedener Apparate, Verhdlg. d. 7. allg. Conf. d. Europ. Gradmessung 1883 in Rom, Anhang VI.

[16] *Memorias del Instituto Geografico y estadístico, VIII (1889), X (1895), XI (1899), XII (1903), Madrid.*

[17] *Verhandlungen d. Conf. d. perm. Comm. d. Int. Erdm. 1887 in Nizza.*

[18] *Defforges*: Mesure de l'intensité absolue de la pesanteur dans la salle du comparateur universel au Bureau International des Poids et Mesures à Bréteuil, Paris 1892. Mémorial du dépôt général de la guerre XV, Paris 1894.

[19] *Kühnen, F. und Furtwängler, Ph.*: Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln. Veröff. d. pr. Geod. Inst. Nr. 27, Berlin 1906.

[20] *Helmert, F. R.*: Beiträge zur Theorie des Reversionspendels. Veröff. d. pr. Geod. Inst. u. Cent. Büros d. Int. Erdmessung, Potsdam, 1898.

[21] *Heyl, P. R. und Cook, G. S.*: The value of gravity at Washington. J. Research. NBS, 17 (1936), S. 505—839. Research paper RPg46.

[22] *Clark, J. S.*: An absolute determination of the acceleration due to gravity. Phil. Trans. Roy. Soc., London, Ser. A, 238 (1939), S. 65—123.

[23] *Агалецкий, П. Н., Егоров, К. Н., Марциняк, А. И., Абсолютные определения ускорения силы тяжести в пункте ВНИИМ. Труды ВНИИМ 32(92), 1958.*

(*Agaletski, P. N., Jegorow, K. N. Marzinjak, A. I.*: Absolutbestimmung der Schwerebeschleunigung im Punkte VNIIM. Arb. d. Metr. Forsch. Inst. 32 (92), 1958)

[24] *Bull. Géod. 44 (1957), S. 23 u. 30.*

[25] *Volet, Ch.*: Mesure de l'accélération due à la pesanteur au Pavillon de Breteuil. Compte rend. Acad. d. Sc. de Paris 235 (1952) S. 442—444.

[26] *Thulin, A.*: Détermination absolue de l'accélération due à la pesanteur au Pavillon de Breteuil. Trav. et Mém. BIPM 22 (1961), Heft 1, 91 S.

[27] *Preston-Thomas, H., Turnbull, L. G., Green, E., Deuphinee, T. M. and Kadra, S. N.*: An absolute measurement of the acceleration due to gravity at Ottawa, Can. J. Phys. 38 (1960), S. 824—852.

[28] *Faller, J. E.*: An absolute interferometric determination of the acceleration of gravity. Bull. Géod. 77 (1965) S. 203/204.

[29] *Sakuma, A.*: Etat actuel de la nouvelle détermination absolue de la pesanteur au Bureau International des Poids et Mesures. Bull. Géod. 69 (1963) S. 249—260.

[30] *Rose, J. C., Haubrich, R. A. and Woollard, G. P.*: A method for the measurement of absolute gravity. Bull. Géod. 51 (1959), S. 91—102.

[31] *Bureau Gravimétrique International, Bull. d'Inform. Nr. 11 (1965), Mesure absolue de la pesanteur. S. 35—41.*

[32] *Bureau Gravimétrique International, Bull. d'Inf. Nr. 14 (1966), S. 6—7.*

[33] *Bureau Gravimétrique International, Bull. d'Inf. Nr. 16, 1967.*