
*Absolute Bestimmung der Schwere mit
Reversionspendeln in Potsdam*

1898 –1904 und 1968 –1969

Von Joachim Höpfner, 2012

Erschienen bei der **Deutschen Gesellschaft für Chronometrie, Jahresschrift
2012**, Bd. 51, S. 101- 114.

Absolute Bestimmung der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam

1898–1904 und 1968–1969

Einführung

In der Geschichte der Menschheit hat das Phänomen Zeit stets eine herausragende Rolle gespielt. Erste Zeitmesser waren die Sonnenuhren mit Schattenstab und Skalen. Weitere Geräte, die zur Zeitmessung verwendet wurden, sind Wasseruhren, Sanduhren und Feueruhren. Diese Uhren des Altertums waren sehr ungenau, d.h. die Ungenauigkeit erreichte einige zehn Minuten pro Tag. Um die erste Jahrtausendwende und danach vollzog sich eine rasante Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Mechanische Uhren wurden unabhängig voneinander an mehreren Orten erfunden. Sie wurden als Räderuhren mit Gewichtsantrieb gebaut. Der Gangregler der ersten Räderuhren war die sogenannte Waag, womit sich die Ungenauigkeit auf etwa zehn Minuten pro Tag reduzierte. Über Jahrhunderte hinweg wurden die Räderuhren fortentwickelt und verbessert.

Um 1600 entdeckte Galileo Galilei (1564–1642, italienischer Mathematiker, Physiker und Astronom) die Pendelgesetze und hatte die Idee, Schwingungen des Pendels zur Zeitmessung zu verwenden, d.h. eine Uhr mit einem Pendel als Gangregler zu bauen. Auch Christiaan Huygens (1629–1695, niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker) erfand eine Pendeluhr. 1657 wurde sie nach seinen Konstruktionsplänen gebaut. Es war die erste Pendeluhr, die eine Gangungenaugkeit von nur noch 10 Sekunden pro Tag hatte. Gegenüber früher war es nunmehr möglich, mit Pendeluhren sehr kleine Zeitabschnitte zu messen. Um 1670 wurde die Ankerhemmung von William Clement (1638–1704, englischer Uhrmacher) erfunden. Indem die Ankerhemmung statt der Spindelhemmung in den Pendeluhren angewandt wurde, wurde die

Gangungenaugkeit der Uhren auf wenige Sekunden pro Tag reduziert, d.h. die Pendeluhren wurden zu Präzisionsuhren. Weitere Genauigkeitsverbesserungen wurden dadurch erreicht, dass Einflüsse von Temperatur und Luftdruck mit dem Kompensationspendel minimiert wurden. [16]

Von 1892 bis 1991 wurden am Geodätischen Institut Potsdam (ab 1969 Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam) geodätisch-astronomische Zeitbestimmungen durchgeführt und ein Technischer Zeitdienst betrieben. Hierbei wurden zur Zeitbewahrung 4 bis 6 Präzisionspendeluhren mit mittleren Gangänderungen von 10 bis 40 Millisekunden pro Tag benutzt. Ab 1933 wurden die ersten beiden Quarzuhren im Technischen Zeitdienst eingesetzt. Diese hatten mittlere Gangänderungen von 0,1 bis 0,3 Millisekunden pro Tag. Bereits 1912 wurden Zeitsignale der Küstenstation Norddeich und der Eifelturmstation aufgenommen, um Signalkorrekturen zum Potsdamer Zeitsystem zu ermitteln. Ab 1923 wurden monatlich Korrekturen für fünf empfangene Zeitsignale an vier Institutionen versandt, und im Laufe der Jahre waren immer mehr Zeitsignale zu überwachen und ihre Signalkorrekturen an immer mehr Institutionen zu senden. [10, 15]

Eine andere bedeutsame Anwendung des Pendels bestand darin, Schwerebestimmungen mit Pendeln durchzuführen. In unserem Aufsatz werden wir die Geschichte der Schweremessungen aufzeigen sowie die Einzelheiten und Ergebnisse der am Geodätischen Institut Potsdam angestellten absoluten Schwerebestimmungen mit Reversionspendeln darstellen. Zum besseren Verständnis werden einige Begriffe und physikalische Grundlagen zunächst erklärt.

Begriffe und physikalische Grundlagen [8]

Pendel

Das Pendel ist ein drehbar aufgehängter Körper, der unter der Wirkung der Schwerkraft Schwingungen um seine Ruhelage ausführt.

Mathematisches Pendel

Es ist eine Idealisierung, bei der man sich die gesamte schwingende Masse in einem Punkt vereinigt denkt, der am Ende eines masselosen, unausdehnbaren Fadens befestigt ist (Fadenpendel).

Die Pendelgesetze lassen sich wie folgt formulieren:

1. Die Schwingungsdauer T ist unabhängig von der Masse des Pendelkörpers.
2. Für kleine Schwingungen ist sie unabhängig von der größten Auslenkung aus der Ruhelage, der Schwingungsweite oder Amplitude.
3. Die Schwingungsdauer T, welche die Zeit eines Hin- und Hergangs bedeutet, ist

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

wobei l die Pendellänge und g die Erdbeschleunigung sind.

Physikalisches Pendel

Hierbei ist die räumliche Ausdehnung des schwingenden Körpers zu berücksichtigen. Schwingungsmittelpunkt bis Abstand vom Drehpunkt: Das ist die reduzierte Pendellänge.

Das Sekundenpendel

Die halbe Schwingung eines Sekundenpendels dauert eine Sekunde. Seine Pendellänge l ist rd. 99,4 cm. Die hierfür umgeformte Formel lautet:

$$l = T^2 \frac{g}{4\pi^2} \quad \text{mit } T = 2 \text{ s und } g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Das Reversionspendel

Die Besonderheit von Reversionspendeln besteht darin, dass die zwei Aufhängepunkte so eingestellt werden, dass sie exakt dieselbe Schwingungsperiode besitzen. Damit wird das schwierige Problem umgangen, den Schwerpunkt des Pendels zu bestimmen, um die Pendellänge genau zu bestimmen. Die Aufgabe reduziert sich auf die Messung der Distanz zwischen den beiden Schneiden, deren Wert die in die Schwingungsformel einzugebende Pendellänge ist.

Die Formel zur Berechnung der Erdbeschleunigung lautet:

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$$

Die Erdbeschleunigung wird auch Erdschwerebeschleunigung oder kurz Schwere genannt. Verwendete Maßeinheiten für die Schwere sind:

$$\text{m/s}^2, 1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2, 1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2, 1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2.$$

Um die Ortsabhängigkeit der Schwere zu zeigen, sind in Tabelle 1 die Schwerewerte für ausgewählte Orte in Deutschland sowie für Pol und Äquator zusammengestellt. [11]

Station	Breite	Länge	Höhe in m	Schwere in m/s ²
Pol	90° N		0	9,832 35
Flensburg	54° 47' N	9° 26' E	12	9,814 90
Potsdam	52° 23' N	13° 04' E	87	9,812 60
Wetzell	49° 09' N	12° 53' E	610	9,808 36
Garmisch	47° 30' N	11° 05' E	710	9,805 85
Zugspitze	47° 25' N	10° 59' E	2965	9,800 56
Äquator	0°		0	9,780 49

Tabelle 1 Schwerewerte für ausgewählte Stationen in Deutschland sowie für Pol und Äquator

Geschichtlicher Überblick über Pendel-**bewegungen und Pendelmessungen** [1, 12, 15]

Ab 1585 befaßte sich Galileo Galilei (1564–1642, italienischer Mathematiker, Physiker und Astronom) mit Pendelbewegungen und fand die Pendelgesetze.

1629 schrieb G. Galilei die Pendelgesetze nieder: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, wobei die Erdbeschleunigung g als Naturkonstante betrachtet wird.

Gesetz des Isochronismus der Pendelschwingungen:

Die Periode der Pendelbewegung T ist nicht von der Auslenkung oder dem Gewicht des Pendels, sondern von dessen Länge l abhängig. Bei kleinen Amplituden sind also alle Schwingungen des Pendels von gleicher Dauer, d.h. isochron.

1644 Marin Mersenne (1588–1648, französischer Theologe, Mathematiker und Musiktheoretiker) machte Christiaan Huygens auf die Verwendbarkeit des Pendels in der Zeitmessung aufmerksam, was zur Erfindung der Pendeluhr führte. Er bestimmte g durch Messung von l und T eines Fadenpendels.

1647 Giovanni Battista Riccioli (1598–1671, italienischer Theologe und Astronom) bestimmte g mit einem Fadenpendel.

1657 Christiaan Huygens (1629–1695, niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker) nutzte seine Untersuchungen von Pendelbewegungen zum Bau von Pendeluhren, indem er das Pendel als Regler verwendet.

1669 Jean-Felix Picard (1620–1682, französischer Priester, Geodät und Astronom) bestimmte g mit größerer Genauigkeit gelegentlich seiner Gradmessung.

1672 Jean Richer (1630–1696, französischer Astronom) stellte die Ortsabhängigkeit von g fest, d.h. g ist keine Naturkonstante.

1735 Pierre Bouguer (1698–1758, französischer Astronom, Geodät und Physiker) und Charles-Marie de La Condamine (1701–1774, französischer Reisender, Mathematiker und Astronom) führten Schweremessungen mittels eines unveränderlichen Fadenpendels während der Gradmessung in Peru aus. P. Bouguer berücksichtigte den Luftauftrieb für die Pendelmasse.

1743 Alexis-Claude Clairaut (1713–1765, französischer Mathematiker, Astronom und Physiker)

veröffentlichte seine »Théorie de la Figure de la Terre« (Theorie über die Gestalt der Erde), welche die Form, die ein rotierender Körper automatisch durch die natürliche Schwerkraft seiner Teile annimmt, genauer berechnete als Isaac Newton (1643–1727, englischer Physiker und Mathematiker). Das sogenannte Clairaut-Theorem bestimmt die Erdabplattung aus der Fliehkraft am Äquator sowie der Schwerkraft am Äquator und an den Polen.

1747 Daniel Bernoulli (1700–1782, Schweizer Mathematiker und Physiker) stellte die Theorie auf, wonach die Abnahme der Pendelamplitude eines freischwingenden Pendels in geometrischer Progression erfolgt. Hierfür stellte Jean-Charles de Borda (1733–1799, französischer Mathematiker und Physiker) die noch heute verwendete Formel auf.

1792 Jean-Charles de Borda und Jean-Dominique Cassini (IV, 1748–1845, französischer Physiker) benutzten für ihre Messungen ein 2-s-Fadenpendel. Dabei bestimmten sie zum ersten Mal die Schwingungsdauer mit Hilfe der Koinzidenzmethode.

1811 Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger (1765–1831, deutscher Astronom, Mathematiker und Physiker) schlug das Reversionspendel für Schweremessungen vor.

1817 baute Henry Kater (1777–1835, englischer Wissenschaftler) das erste Reversionspendel und bestimmte damit die Länge des Sekundenpendels, und 1818 konstruierte er ein invariables Pendel.

1817 bis 1831 Louis Claude de Freycinet (1779–1842, französischer Navigator), Sir Edward Sabine (1788–1883, irischer Astronom und Physiker), von Lütke und Henry Foster (1796–1831, englischer Offizier und Wissenschaftler) führten Schwerbestimmungen mittels invariabler Pendel auf 45 Stationen zwischen -63° und $+80^\circ$ geographischer Breite aus. Sie erreichten Genauigkeiten von ± 3 mGal bis ± 6 mGal für eine einmal gemessene Schweredifferenz.

1826/1827 Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846, deutscher Astronom, Mathematiker und Geodät) ging wieder zum Fadenpendel über, weil es Schwierigkeiten bei der Formgebung der Schneide und bei der Messung des Schneiden-

abstandes gab. Die Hauptschwierigkeiten bereiteten ihm die Berücksichtigung des Luftinflusses und die Bestimmung der Lage des Schwingungsmittelpunktes. Seine theoretischen Betrachtungen führten zu der Schlussfolgerung, dass sich diese Fehlerquellen besser durch ein Reversionspendel ausschalten lassen.

Um 1845 gab F.W. Bessel Vorschläge für die Fertigung eines Reversionspendels, nämlich symmetrisch der Figur nach und mit auswechselbaren Schneiden.

1849 Sir George Gabriel Stokes (1819–1903, irischer Mathematiker und Physiker) stellte Untersuchungen über die Gestalt von Niveaulächen an. Sein Ergebnis war, dass man über die ganze Erde verteilte Schwerewerte dazu benutzen kann, die Figur der Erde zu bestimmen.

1851 Léon Foucault (1819–1868, französischer Physiker) zeigte die Erdrotation mit einem 62 m langen Pendel, dessen Körper die Masse 28 kg hatte. Seine Schwingungsebene liegt im Raum fest, dreht sich also auf der sich drehenden Erdoberfläche.

1854 Sir George Biddell Airy (1801–1892, englischer Mathematiker und Astronom) führte relative Pendelmessungen zur Bestimmung der mittleren Dichte der Erde in einem Schacht aus (Teufenunterschied 450 m). Hierbei wurde die Unsicherheit der Bestimmung des Uhrgangs durch Benutzung einer Pendeluhr für beide, gleichzeitig besetzte Meßpunkte vermindert. Als Ergebnis für den Schwereunterschied erhielt Airy nach vier Wochen Beobachtungszeit einen mittleren Beobachtungsfehler von $\pm 0,2$ mGal.

1861 Georg Balthasar von Neumayer (1826–1909, deutscher Geophysiker und Polarforscher) verwirklichte Bessels Vorschläge von 1845 beim Bau eines Reversionspendels. Er bestimmte den Schneidenabstand zum ersten Male bei hängendem Pendel. Der benutzte Maßstab zeigte größere Unsicherheiten.

Abplattung der Erde und Schwerebestimmungen [10, 15]

1861 Johann Jacob Baeyer (1794–1885, preußischer General und Geodät) veröffentlichte eine Denkschrift [2] zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung:

Johann Jacob Baeyer: Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung. Berlin 1861 [3]

Hiernach resultierten für die Abplattung der Erde $\alpha = 1:299$ aus Breitengradmessungen und $\alpha = 1:289$ aus Schwerebestimmungen. Aus dieser Diskrepanz ergab sich als Aufgabe der Mitteleuropäischen Gradmessung (M.E.G.), nicht nur Breitengradmessungen, sondern auch Schwerebestimmungen zu veranlassen.

1862 fand die Gründungskonferenz zur Mitteleuropäischen Gradmessung in Berlin statt. Diese Konferenz gilt als Gründung zur internationalen geodätischen Zusammenarbeit in der International Association of Geodesy (IAG) mit J.J. Baeyer als erstem Präsidenten der IAG.

1866 wird in Berlin ein Zentralbüro der Gradmessung unter J.J. Baeyer als dessen Präsident geschaffen, und 1870 wird ein Geodätisches Institut unter J.J. Baeyer als dessen Präsident gegründet.

1817 bis 1830 waren meist relative Schwerebestimmungen mit invariablen Pendeln ausgeführt worden. Die M.E.G. entschloss sich deshalb dazu, die von Bessel gemachten Vorschläge zur Konstruktion eines symmetrisch geformten Pendels mit reziproken Achsen zu verwirklichen.

Absolute Schwerebestimmungen mittels Reversionspendelapparat von Repsold

[11, 12, 15]

1862 wurde bei der Firma Repsold und Söhne in Hamburg nach den Besselschen Vorschlägen ein Reversionspendelapparat [12] zur Ausführung absoluter Schwerebestimmungen für die Schweizer Gradmessungskommission gebaut.

1869 wurde ein gleicher Reversionspendelapparat von Repsold durch das Zentralbüro der Europäischen Gradmessung angeschafft und weitere Instrumente in vielen anderen Ländern.

In Abb. 1 ist ein solcher Apparat dargestellt. Das Reversionspendel ist ein hohler Messingzylinder von ca. 4 cm Durchmesser und von 1,25 m Länge. Zwischen den Gewichten, die an den Enden angebracht sind, hat die Stange zwei Ausschnitte zur Aufnahme der Schneiden.

1869 bis 1871 wurden absolute Schwerebe-

stimmungen mit dem Repsoldschen Pendelapparat auf 10 Stationen in Preußen und Sachsen durch das Zentralbüro der Europäischen Gradmessung und das Geodätische Institut ausgeführt, wobei die Schwingungsdauer in 16 Kombinationen (Schneiden umgelegt und vertauscht, schweres Gewicht oben und unten) bestimmt wurde. 1869 erfolgte die Markierung von Nulldurchgängen mittels Taster, um die Schwingungsdauer zu bestimmen, wobei bei einer Messunsicherheit der Zeitdauer für 1000 Schwingungen von $1,5 \times 10^{-5}$ die Genauigkeit der Schwerebestimmung ± 7 mGal ergab. 1870 wurde die Koinzidenzmethode zur Messung der Schwingungsdauer angewandt, wodurch sich die Genauigkeit der Schwerebestimmung auf ± 3 mGal verbesserte.

Für jede Kombination wurde die Bestimmung der Pendellänge vor und nach den Schwingungsbeobachtungen unter Berücksichtigung des Schneidenbeleuchtungseffektes ausgeführt, wobei mit aufrechtem und umgekehrtem Maßstab gearbeitet wurde.

Zur Ableitung des Uhrganges für die Stationsuhr erfolgten geodätisch-astronomische Zeitbestimmungen.

Für jede Hauptkombination wurde der Schwerpunkt je einmal am Anfang und am Ende bestimmt.

Da der Transport des großen Pendelapparates zu den Feldstationen große Schwierigkeiten bereitet, wurde 1874 auf der 4. Allgemeinen Konferenz der Europäischen Gradmessung in Dresden eine Pendelkommission unter dem Vorsitz von J. J. Baeyer (1794–1885) und mit den Mitgliedern Karl Christian Bruhns (1830–1881, deutscher Astronom und Geodät), Adolph Hirsch (1830–1901, schweizerischer Astronom), Theodor v. Oppolzer (1841–1886, österreichischer Astronom), Christian Peters (1806–1880, deutscher Astronom) und Theodor Albrecht (1843–1915, deutscher Geodät und Astronom) gebildet. Ihre Aufgabe bestand darin, ein sicheres und rationelles Verfahren zur Messung in Schwerenetzen zu ermitteln. [20]

Wichtige Erkenntnisse und Empfehlungen, die im Kommissionsbericht [21] von J. J. Baeyer gegeben wurden, sind:

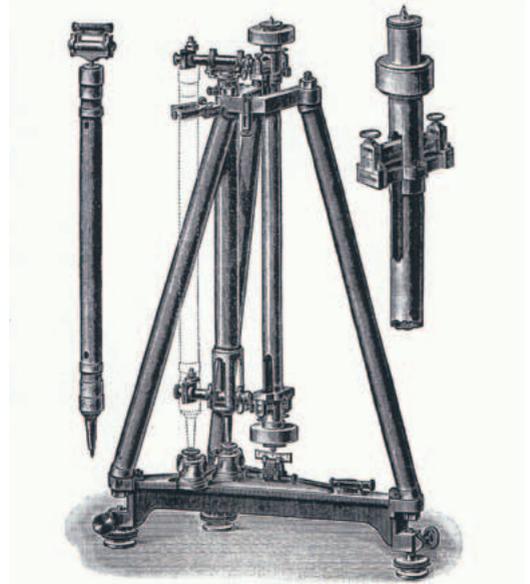


Abb.1 Repsoldscher Pendelapparat [12]
Mit Stativ, Pendel, Komparator und Maßstab, der am Stativ nur angedeutet, aber links daneben dargestellt ist; rechts im Bild ist das vergrößert dargestellte obere Pendelende zu sehen

- Verfälschungen der Ergebnisse der Schwerebestimmungen treten wegen Mitschwingens des Stativs des Pendelapparates auf
- Schäden gibt es beim Transport des Gerätes wegen dessen Empfindlichkeit
- Zur besseren Temperaturbestimmung ist die Benutzung von 1–2 Hilfspendeln aus gleichem Material und gleicher Form zu empfehlen
- Als beste Lösung ergibt sich, zunächst nur an wenigen Stationen die absolute Schwere mit einem verbesserten Reversionspendel zu bestimmen. An diese Stationen werden dann weitere Stationen durch relative Messungen mittels eines invariablen Pendels angeschlossen.

1875 ermittelte Charles Sanders Peirce (1839–1914, amerikanischer Philosoph, Physiker und Mathematiker) den Einfluss des Mitschwingens des Repsoldschen Pendelstativs zu etwa 150 mGal. Bald danach fand Emile Plantamour (1815–1882, schweizerischer Astronom), dass zudem der Einfluss des Untergrundes diesen Wert um 30 mGal verändern konnte.

1884 wurde eine absolute Schwerebestimmung in Wien durch Theodor v. Oppolzer (1841–1886, österreichischer Astronom) ausgeführt.

1885 starb J.J. Baeyer, und ab 1886 wurde Friedrich Robert Helmert (1843–1917, Geodät, Begründer der mathematischen und physikalischen Theorien der modernen Geodäsie) sein Nachfolger als Direktor des Geodätischen Instituts.

1887 erfolgte die Konstruktion eines invariablen Einpendelapparates durch Robert D. v. Sterneck (1839–1910, österreichischer Astronom, Physiker und Geodät). Weiter verfolgt wurde der von Baeyer gemachte Vorschlag zur absoluten Schwerebestimmung mit einem verbesserten Reversionspendel.

1889 bis 1892 wurde das Hauptgebäude des Geodätischen Instituts Potsdam (GIP), heute Helmert-Haus des GeoForschungsZentrums (GFZ) errichtet. [10]

F.R. Helmert selbst hatte maßgeblich Einfluss darauf genommen, wie das Bauprojekt gemäß den künftigen Anforderungen auszuführen war, speziell Pendelsaal als temperaturstabilisierter Raum im Innern des Gebäudes mit einem Doppelpfeiler für Reversionspendelmessungen und drei weiteren Pfeilern für Messungen mit Relativpendelgeräten (siehe Abb. 8).

Ab 1892 wurde zunächst das Wiener Schwere-system benutzt, ab 1909 das Potsdamer Schwere-system [18].

1892 begann die Potsdamer Zeit für das Geodätische Institut. [14, 15]

Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch F. Kühnen und Ph. Furtwängler [13, 18]

Voruntersuchungen

F.R. Helmert und Richard Schumann (1864–1945, Astronom, Geodät und Geophysiker), später auch Friedrich J. Kühnen (1858–1940, Mathematiker, Physiker und Geodät) und Philipp Furtwängler (1869–1940, Mathematiker und Physiker) stellten Untersuchungen zur Verbesserung der Reversionspendelmethode an.

1898 erschien die Publikation »Beiträge zur Theorie des Reversionspendels« von F.R. Helmert. [9]

Helmert befaßte sich darin mit folgenden Problemen:

- Einfluss der Elastizität des Pendels
- Einfluss der umgebenden Luft
- Parallelismus der Schneiden
- Symmetrie der äußeren Form
- Abrollen der Schneide auf dem Lager
- Verschiebungen der Schneide und des Lagers
- Mitschwingen des Stativs und des Untergrundes
- Gleiten der Schneide auf dem Lager
- Glissement (Effekt als Kombination von Rollen und Gleiten)
- Einfluss des Schwingungsbogens auf die Schwingungsdauer
- Reduktion der Schwingungsdauer auf gleiche Luftdichte
- Verkürzung des Maßstabes durch sein Gewicht
- Einfluss der Dehnung des Pendels und eines Höhengradienten der Temperatur.

1902 entwickelte Ph. Furtwängler grundlegende Formeln zum Mitschwingen des Stativs. [7]

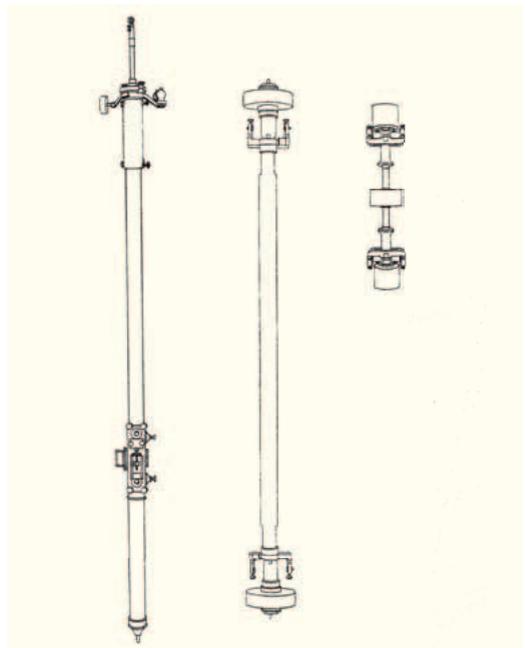


Abb. 2 Fadenpendel, Sekundenpendel und Halbs Sekundenpendel (von links nach rechts) für den Potsdamer Reversionspendelapparat [13]

Hauptmessungen

1898–1904 wurde der Absolutwert der Schwere mit Reversionspendeln im Pendelsaal des Geodätischen Instituts Potsdam durch Friedrich Kühnen und Philipp Furtwängler bestimmt.

Für die Messungen wurden 5 Reversionspendel aus Messing, angefertigt von Repsold, verwendet:

1. Ein altes Sekundenpendel des GIP (erworben 1869, Masse von 5,57 kg)
2. Ein Sekundenpendel des Osservatorio astronomico zu Padua (5,87 kg)
3. Ein schweres Sekundenpendel des K. und K. Militärgeographischen Instituts Wien (6,23 kg)
4. Ein leichtes Sekundenpendel des K. und K. Militärgeographischen Instituts Wien (2,86 kg)
5. Ein Halbs Sekundenpendel des GIP (erworben 1892, 3,53 kg).

Bei Vorversuchen zeigte ein neu entwickeltes Sekundenpendel des GIP stark elastische Biegsamkeit und wurde deswegen nicht weiter verwendet. Ein Fadenpendel diente zur Kontrolle des Mitschwingens. Abb. 2 veranschaulicht das Fadenpendel, ein Sekundenpendel und das Halbs Sekundenpendel. Der Reversionspendelapparat ist in Abb. 3 zu sehen. Ferner gehörte zur Pendelausrüstung ein Koinzidenzapparat nach Sterneck und ein neuer Maßstab. Wegen der örtlichen Aufstellung der Reversionspendelapparatur im Institutsgebäude sei auf Abb. 8 verwiesen.

Die Schwingzeitmessungen wurden für zwei lange Serien, in denen jeweils Schneiden und Lager vertauscht wurden, ausgeführt. Dabei standen 5 Schneiden-Lager-Paare teils aus Achat und teils aus Stahl zur Verfügung:

- in der ersten Serie, in der die Pendel mit Schneiden auf ebener Unterlage schwangen, wurden die Koinzidenzen nach der elektrischen Methode von Sterneck beobachtet, und
- in der zweiten Serie, in der die Pendel mit ebenen Flächen auf feststehender Schneide schwangen, wurde eine optische Koinzidenzmethode verwendet.

Die Beobachtungen wurden nach den Methoden von Helmert reduziert, die in seinen »Beiträgen zur Theorie des Reversionspendels« [9] veröf-



Abb. 3 Potsdamer Reversionspendelapparat

(Quelle: Archiv des GFZ)

Stativ auf Doppelpfeiler S0 mit im Vakuumzylinder eingehängtem Pendel im geöffneten Pendelschrank im Pendelsaal. Vorn, links: Komparator für Längenmessungen

fentlich sind: Aus den Koinzidenzintervallen wurden die unreduzierten Schwingungsdauern berechnet. An diese wurden folgende Reduktionen angebracht:

- wegen Aufhängung
- Amplitudenreduktion (Ausschlag)
- Temperaturreduktion
- Reduktion wegen variabler Luftdichte
- Reduktion auf Sternzeitsekunden (Uhrgang)
- wegen des Mitschwingens der Pendelunterlage (Formeln nach Furtwängler)
- wegen elastischer Biegung und Dehnung des Pendels und
- Reduktion wegen Unsymmetrie des Pendels.

Nach Reduktion der Beobachtungen wurde eine Ausgleichung nach einem Ansatz von Helmert ausgeführt. Das Endergebnis lautet:

Länge des einfachen Sekundenpendels (994,239 ± 0,003) mm und damit der Schwerewert

$$g = (981274 \pm 3) \text{ mGal},$$

das sich auf den Absolutpfeiler S0 mit den geographischen Koordinaten 52° 22,86' nördlicher Breite und 13° 04,06' östlicher Länge und der Höhe 87,00 m im Pendelsaal bezieht.

1906 erschien die Veröffentlichung »Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln« [14] von F. Kühnen und Ph. Furtwängler, dessen Titelseite Abb. 4 zeigt. Von 1909 bis 1971 wurde der abgeleitete Schwerewert weltweit als internationaler Bezugswert des Potsdamer Schweresystems verwendet.

1932 gelang Heinz Schmehl (1900–1944, deutscher Geodät) die geschlossene Integration des Furtwänglerschen Formelausdrucks zum Mitschwingen des Stativs. [17]

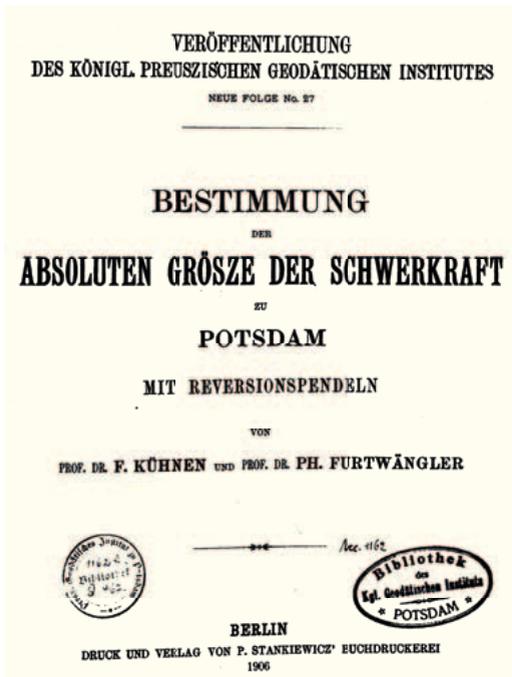


Abb. 4 Titelseite der Veröffentlichung über die absolute Schwerebestimmung mit Reversionspendeln in Potsdam 1898–1904 [14]

Andere Messungen und die weitere Entwicklung [15]

1934 bis 1935 wurden Messungen nach dem Reversionspendelverfahren in Washington (USA) von P.R. Heyl und G.S. Cook ausgeführt.

1936 bis 1938 erfolgten Messungen nach dem Reversionspendelverfahren in Teddington (England) von J.S. Clark.

Diese Messungen zeigten, dass der Potsdamer Schwerewert einen systematischen Fehler zwischen –20,0 und –12,8 mGal hat.

Nach dem 2. Weltkrieg setzte eine starke Aktivität auf dem Gebiet der absoluten Schwere-messungen ein. Dabei wurden zunächst Pendel- und Fallmethoden nebeneinander angewandt. Bedingt durch die Entwicklung der Kurzzeitmesstechnik, hat man aber schließlich den Fallmethoden den Vorzug gegeben.

Am GIP erfolgten die Vorarbeiten zur Neubestimmung der absoluten Schwere, als über erste Versuche und Pläne mit Fallmethoden berichtet wurde, aber eine Wertung dieser Verfahren noch nicht möglich war. [14]

Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch R. Schüler, G. Harnisch, H. Fischer und R. Frey [19, 14, 4, 5]

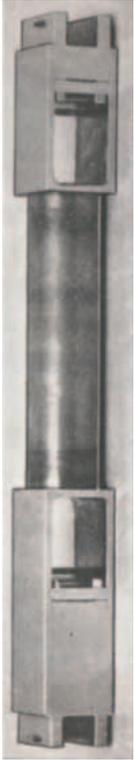
1956 begannen Vorarbeiten für die Messungen auf Initiative und unter Leitung von Karl Reicheneder (1903–1981, Physiker). An den Arbeiten der absoluten Schwere-messungen waren die Wissenschaftler Rudi Schüler (1925–2004, Physiker), Günter Harnisch (geb. 1936, Geophysiker), Harald Fischer (geb. 1939, Physiker) und Reiner Frey (geb. 1938, Geodät) beteiligt. [11] Es wurden zwei Messeinrichtungen mit Reversionspendeln entwickelt:

- ein Reversionspendelgerät mit 25 cm langen Messingpendeln und
- ein Quarzpendelgerät mit drei Pendelpaaren verschiedener Länge

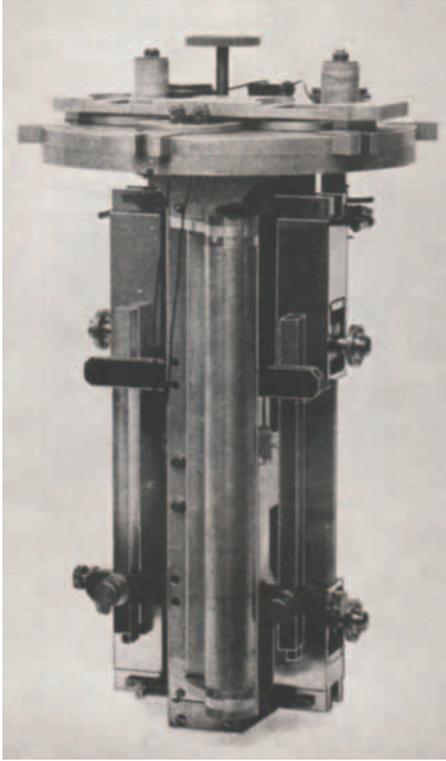
Bei beiden Geräten wurde das Zweipendelverfahren angewandt.

Das 25-cm-Reversionspendelgerät

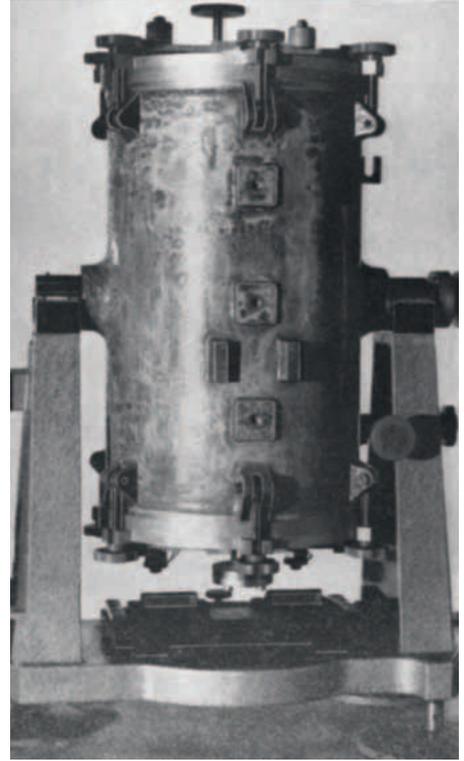
Es wurde speziell für ein Paar Messingpendel mit pendelfesten Schneiden und einer reduzierten Pendellänge von 25 cm eingerichtet. Die Masse



5



6



7

Abb. 5 Pendel für das 25-cm-Reversionspendelgerät [19]

Abb. 6 Innenansicht des 25-cm-Reversionspendelgerätes [19]

Abb. 7 25-cm-Reversionspendelgerät auf dem Pfeiler S8 im Pendelsaal [19]

der Pendel beträgt 4 kg. Abb. 5 zeigt, wie beide Messingpendel aufgebaut sind.

Eine Innenansicht des 25-cm-Reversionspendelgerätes ist in Abb. 6 dargestellt. Das Gerät hat ein doppel-T-förmiges Stativ mit vier Lagerflächen, die den Pendelschneiden zugeordnet sind. Was die Reversion betraf, so erfolgte die Drehung der Pendel im Vakuumbehälter zusammen mit dem Stativ, wobei ein Vakuum von etwa 1×10^{-4} Torr erhalten bleibt. Schneiden und Lagerflächen sind auswechselbar für verschiedene Materialpaarungen von Achat und Stahl.

Die Messung von Schwingungsdauern für beide Pendel wurde mit zwei getrennten elektronischen Zählern ausgeführt, wobei die Vorwahl der Anzahl von Pendelschwingungen

1000 Schwingungen war. Die Schwingzeitmessungen begannen, indem der Schwingungsvorgang elektromagnetisch ausgelöst wurde; die Schwingungsamplituden betragen etwa $14'$ und wurden photographisch registriert. Die Phasendifferenz zwischen beiden Pendeln wich beim Start um nicht mehr als 4° vom Sollwert 180° ab. Die Schwingzeitmessungen waren wegen unterschiedlicher Krümmungsradien der Schneiden in mindestens zwei Schneidenlagen auszuführen.

Die Bestimmung der Pendellänge (Abstand der einander zugekehrten Schneidenkanten) erfolgte

– durch den interferometrischen Vergleich der Schneidenrückflächen mit zwei Quarzetalons,

die im Vakuumbehälter neben den Pendeln angeordnet sind, und

– durch Messung der Schneidhöhen auf einem Interferenzkomparator außerhalb des Pendelgerätes, Länge in Arbeitslage; zum Längenvergleich war keine Belüftung nötig.

Das Mitschwingen des Stativs wegen großem Mitschwingkoeffizienten (geringe mechanische Stabilität wegen Revertierbarkeit) war zu berücksichtigen.

Schwingzeit- und Längenmessungen sind wegen des großen Temperaturkoeffizienten von

Messing sehr stark temperaturabhängig; deshalb wurde ein Thermometerpendel im Gerät benutzt. Eine Temperaturänderung von 0,02 Grad ruft eine Längenänderung von 0,1 μm hervor.

Eine Gesamtansicht des 25-cm-Reversionspendelgerätes zeigt Abb. 7. Für die Messungen wurde das Gerät auf dem Pfeiler S8 im Pendelsaal aufgestellt. Zur Information über die Lage der benutzten gravimetrischen Anschlusspunkte ist der Grundriss des Institutsgebäudes zusammen mit diesen Punkten in Abb. 8 dargestellt.

Abb. 8 Grundriss des Institutsgebäudes mit gravimetrischen Anschlusspunkten [11, 19]

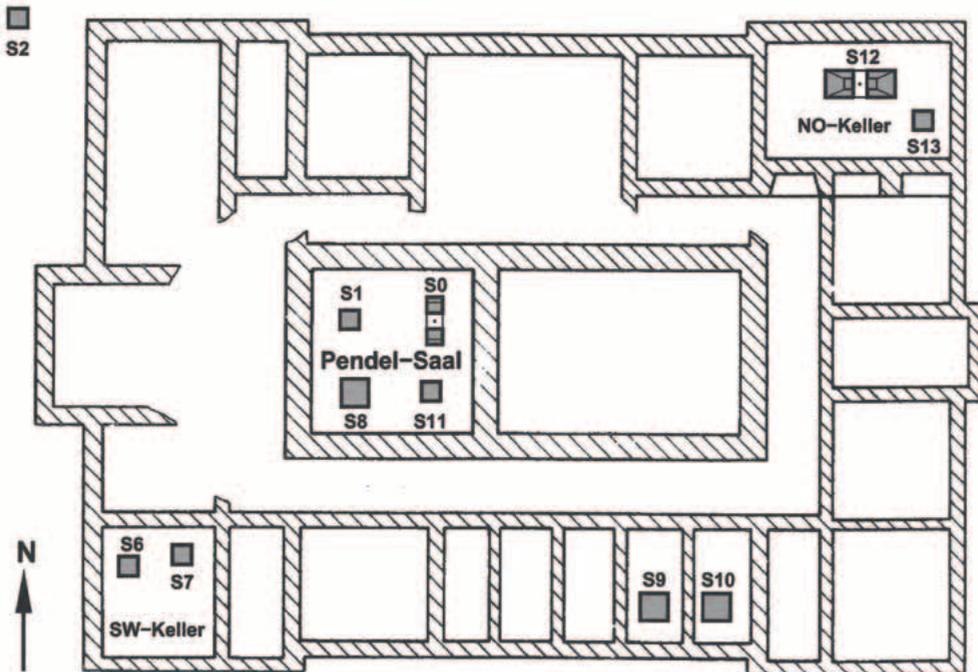
S0 Doppelpfeiler, auf dem F. Kühnen und Ph. Furtwängler ihre Messungen mit Reversionspendeln zwischen 1898 und 1904 durchgeführt haben

S8, S1 und S11 Pfeiler, die R. Schüler, G. Harnisch, H. Fischer und R. Frey für den Aufbau ihrer 25-cm-Reversionspendel-Messanlage 1968 und 1969 verwendeten

S12 Doppelpfeiler, auf dem R. Schüler, G. Harnisch, H. Fischer und R. Frey für ihre Messungen das Quarzpendelgerät 1968 und 1969 aufgestellt haben

S2 Granitplatte vor dem Institutsgebäude, Anschlusspunkt für Gravimetermessungen

S6, S7, S9, S10 und S13 weitere Pfeiler



Das Quarzpendelgerät

Die Messungen am Quarzpendelgerät wurden mit drei Reversionspendelpaaren verschiedener Länge, aber gleicher Masse durchgeführt. Die reduzierten Pendellängen betragen 75 cm, 50 cm und 37,5 cm. Eine schematische Darstellung der Pendel zeigt Abb. 9.

Angaben zu Material und Form der Pendel sind nachstehend aufgelistet:

- optisches Quarzglas bis auf kleine Abstimm-schrauben
- Doppel-T-Profil (große Biegesteifigkeit!)
- ebene, parallele Schwingflächen, mit denen sie auf feststehenden Schneiden schwingen (Messung der Pendellängen mit größerer Genauigkeit)
- Bedampfung der Pendel mit Aluminiumschicht zur Vermeidung elektrostatischer Aufladung

Das geöffnete Quarzpendelgerät ist in Abb. 10 zu sehen. Der Pendelapparat ruht auf einem massiven Doppelpfeiler aus Granit. Das ist der Pfeiler S12 im NO-Keller des Institutsgebäudes (keine Mitschwingeffekte sind zu berücksichtigen). Zu

beiden Seiten des Pendelapparates: Autokollimationseinrichtung zur Justierung der Pendel und zur Bestimmung der Pendelamplitude (etwa $20'$). Abb. 11 zeigt das Quarzpendelgerät auf dem Pfeiler S12. Wie bereits oben gesagt, sind die gravimetrischen Anschlusspunkte im Grundriss des Institutsgebäudes in Abb. 8 eingezeichnet.

Bei der Reversion müssen die Pendel herausgenommen und in der neuen Lage wieder justiert werden.

Zur Schwingzeitmessanlage gehören:

- eine unter dem Pendelapparat angeordnete Autokollimationseinrichtung und
- mehrere elektronische Zähler und Messwertdrucker.

Die Schwingzeitmessungen wurden mit jeweils zwei Pendeln gleicher Länge, die mit einer Phasendifferenz von 180° schwingen, im evakuierten Pendelapparat bei 10^{-4} bis 10^{-5} Torr ausgeführt.

Zur Genauigkeit der Messungen der Schwingungsdauer sei gesagt, dass bei einer Messdauer von 1000 Pendelschwingungen die Schwingungsdauer auf 10^{-8} genau erhalten wurde.

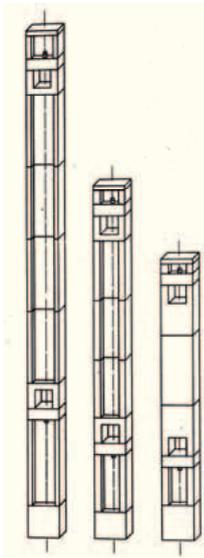


Abb. 9 Quarzpendel mit 75,0 cm, 50,0 cm und 37,5 cm Länge [19]

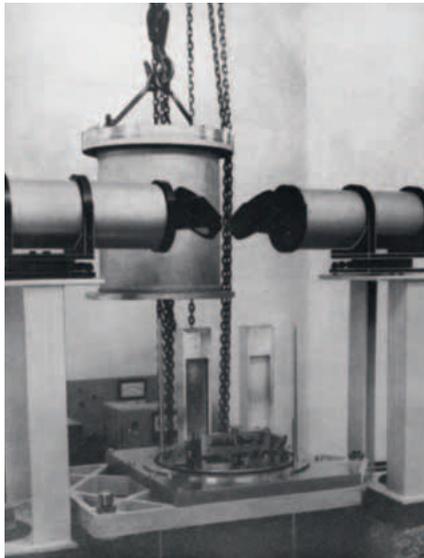


Abb. 10 Quarzpendelgerät, geöffnet [19]



Abb. 11 Quarzpendelgerät auf dem Pfeiler S12 im NO-Keller (Aufnahme: L. Hannemann)

Quarz hat nur eine geringe Wärmeausdehnung, deshalb ist der Temperatureinfluss nur gering und kann sicher erfasst werden.

Längenmessung der Pendel

Verwendung fand ein Vakuuminterferometer mit einem Strahlengang nach Dowell, wobei der Abstand der Schwingflächen der Pendel mit Quarzmaßstäben entsprechender Länge verglichen wird (Ansprennen von Planspiegeln nötig). Die erreichte Vergleichsgenauigkeit war 0,01 bis 0,02 μm .

Die Ergebnisse der Messungen lauten:

$g_1 = (981\,260, 89 \pm 0,83)$ mGal für das 25-cm-Reversionspendelgerät und

$g_2 = (981\,259, 86 \pm 0,29)$ mGal für das Quarzpendelgerät und daraus

$g = (981\,260, 1 \pm 0,3)$ mGal als Gesamtergebnis der Messungen mit beiden Geräten.

Die Schwerewerte beziehen sich auf den Doppelpfeiler S0 im Pendelsaal und die Bezugshöhe 87,00m.

1971 erschien die Veröffentlichung »Absolute Schweremessungen mit Reversionspendeln in Potsdam 1968–1969«. Abb. 12 zeigt ihre Titelseite.

Vergleich von Ergebnissen [4, 5]

Die neuen Absolutmessungen der Schwere in Potsdam sind die genauesten jemals ausgeführten Reversionspendelmessungen:

$g = (981\,260, 1 \pm 0,3)$ mGal ist das Gesamtergebnis der Messungen 1968–1969.

Der Vergleich mit den Ergebnissen anderer moderner Absolutgravimeter in Tabelle 2 zeigt, dass der neue Schwerewert keinen systematischen Fehler innerhalb der erreichten Genauigkeit enthält.

Von 1976 bis 2002 wurden Messungen mit folgenden Fallgravimetern am Potsdamer Institut durchgeführt:

- GABL-Gravimeter des Instituts für Automatisierung und elektrische Messtechnik, Novosibirsk
- JILAG3-Gravimeter des Instituts für Erdmessung der Universität Hannover und
- Absolutgravimeter FG5 des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt a.M./Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

Die Schwerebeschleunigung ist orts- und zeitabhängig, und zwar gibt es:

- Ortsabhängigkeit wegen Zentrifugalbeschleunigung, Abplattung der Erde durch die Erdrotation, Höhe und Massenverteilung im Erdkörper (bei mGal-Einheiten sind das die Variationen in der 1. bis 4. Stelle vor dem Komma; siehe Tabelle 1) und
- Zeitabhängigkeit wegen Gezeiten der festen Erde, Luftdruck, Ozean, Polbewegung, Grundwasser, Bodenfeuchte und Höhenänderungen (bei mGal-Einheiten sind das die Variationen in der 1. bis 4. Stelle nach dem Komma; siehe Tabelle 3).

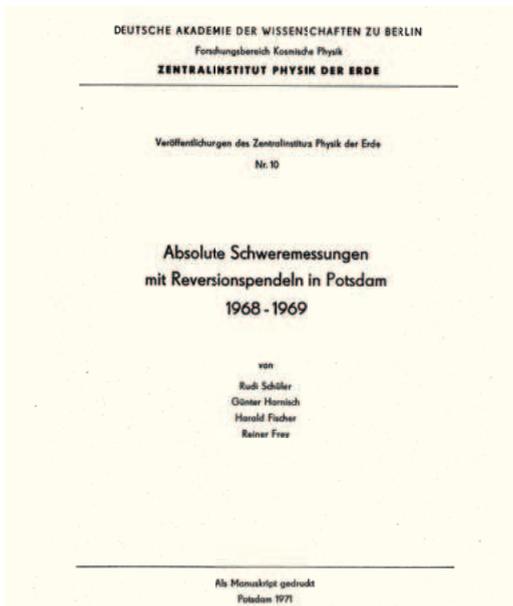


Abb. 12 Titelseite der Veröffentlichung über die absoluten Schweremessungen mit Reversionspendeln in Potsdam 1968–1969 [19]

Tabelle 2 Absolute Schweremessungen in Potsdam

Jahr	Autoren	Gerät	Ergebnis in mGal (1 mGal = 10^{-5} m/s ²)
1898–1904	Kühenen und Furtwängler	Reversionspendel	981 274 ± 3
1968–1969	Schüler et al.	Reversionspendel	981 260,1 ± 0,3
1976, 1978, 1989	Arnautov, Boulanger et al.	Laserfallgravimeter GABL	981 260,02 ± 0,01
1983, 1986			
1988, 1990	Torge, Wenzel, Timmen, Schnüll	Laserfallgravimeter JILAG-3	981 260,00 ± 0,01

Die Ergebnisse beziehen sich auf den Absolutpfeiler S0 im Pendelsaal und die Höhe 87,00 m.

Tabelle 3 Weitere absolute Schweremessungen in Potsdam

Jahr	Institut/Bundesamt	Gerät	Ergebnis in/Gal (1 μ Gal = 10^{-8} m/s ²)
1994	Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG)	Absolut- gravimeter FG5-101	981 261 404 ± 5
2002	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	Absolut- gravimeter FG5-101	981 260 393 ± 3

Neue Geräte für solche Messungen sind transportable Absolutgravimeter, die nach dem Prinzip des freien Falls oder des senkrechten Wurfs arbeiten. Diese erreichen Genauigkeiten in der Größenordnung von wenigen Mikrogal, wie aus Tabelle 3 hervorgeht. [6]

Die Ergebnisse beziehen sich auf den Absolutpfeiler S0 in einer Höhe von 1 m über der Vermarkung, beschriftet mit »Deutsches Schweregrundnetz«, im Pendelsaal.

Für die in Tabelle 3 aufgeführten Messungen wurden die gleichen Korrekturmodelle gewählt. Der hierbei verwendete vertikale Schweregradient beträgt 258,8 μ Gal/m. Er war zwischen der Höhe 125 cm und ca. 25 cm über dem Pfeiler mit 4 Relativgravimetern bestimmt wor-

den. Höchstwahrscheinlich ist die gemessene Schwereänderung von -11μ Gal durch Massenänderungen in unmittelbarer Nähe des Messpunktes verursacht worden. Ein Vergleich der Messungen mit den in Tabelle 2 gegebenen früheren Resultaten ist schwierig, da die Messungen unter anderen Bedingungen durchgeführt worden waren. Außerdem sind z.T. andere Korrekturmodelle für Luftdruck und Gezeiten verwendet worden, ebenso eine andere Reduktion auf den Pfeiler.

Der Artikel ist die überarbeitete Fassung des gleichnamigen, am 22. Mai 2008 gehaltenen Vortrags im Geodätischen Kolloquium am GFZ Potsdam [11].

Literatur

- [1] *Airy, G.B.*: On the Figure of the Earth. Encyclopaedia Metropolitana. Scientific Department, Cambridge 1830, p. 165–240.
- [2] *Baeyer, J.J.*: Entwurf zu einer mitteleuropäischen Gradmessung. Berlin 1861. Nachdruck in: Zur Entstehungsgeschichte der europäischen Gradmessung. Berlin 1882, S. 1–5.
- [3] *Baeyer, J. J.*: Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung. Berlin 1861. 111 S.
- [4] *Elstner, Cl., Fischer, H., Frey, R., Harnisch, G. und R. Schüler*: Absolute Schweremessungen in Potsdam. Vermess.-Technik 18 (1970) 4, S. 128–131.
- [5] *Elstner, Cl., Harnisch, M. und G. Harnisch*: Gravimetrische Arbeiten im Geodätischen Institut und im Zentralinstitut der Erde 1870–1991. In: Zur Geschichte der Geophysik in Deutschland. Jubiläumsschrift zur 75jährigen Wiederkehr der Gründung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft. Hamburg (1997) S. 182–186.
- [6] *Falk, R.*: Persönliche Mitteilung über die Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter FG5-101 vom IfAG im Jahre 1994 und vom BKG (früher IfAG) im Jahre 2002
- [7] *Furtwängler, Ph.*: Über die Schwingungen zweier Pendel mit annähernd gleicher Schwingungsdauer auf gemeinsamer Unterlage. Sitzungsber. Kgl. Preuß. Akad. Wiss. zu Berlin 1902. Phys.-Math. Klasse, S. 245–253.
- [8] *Haendel, A.*: Grundgesetze der Physik. Bibliothek Wissen und Schaffen. Fachbuchverlag Leipzig 1953, S. 46–50.
- [9] *Helmert, F.R.*: Beiträge zur Theorie des Reversionspendels. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. und Centralbureau der Internat. Erdmessung. Potsdam 1898. 92 S.
- [10] *Höpfner, J.*: Über die Geschichte des Geodätischen Instituts Potsdam. Übersichtsvortrag am GFZ Potsdam, 15. Okt. 2007. Siehe http://bib.gfz-potsdam.de/pub/digi/gip-geschichte_hoepfner.pdf.
- [11] *Höpfner, J.*: Absolute Bestimmung der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam 1898–1904 und 1968–1969. Vortrag im Geodätischen Kolloquium am GFZ Potsdam, 22. Mai 2008. Siehe http://www.dvw-lv1.de/3_termine/20080522_Dr_Hoepfner.pdf.
- [12] *Jordan/Eggert*: Handbuch der Vermessungskunde 3. Bd., 2. Halbband, Stuttgart 1941, S. 329–344.
- [13] *Kühnen, F. und Ph. Furtwängler*: Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln. Veröff. Kgl. Preuß. G. I., Neue Folge Nr. 27, Berlin 1906. 390 S.
- [14] *Lerbs, L., Sass, I. und A. Stange*: Bibliographie der Mitarbeiter des Geodätischen Instituts 1861–1967. Arb. Geod. Inst. Potsdam (1968) 22
- [15] *Lerbs, L.*: Über die Entwicklung des Geodätischen Instituts Potsdam von der Gründung 1870 bis zur Eingliederung in das Zentralinstitut für Physik der Erde 1969. Diss. bei der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam 1970
- [16] *Padelt, E.*: Menschen messen Zeit und Raum. Verlag Technik, Berlin 1971, S. 22–55.
- [17] *Schmehl, H.*: Ein Beitrag zum Zweipendelverfahren bei relativen Schweremessungen. Z. Geophys. 8 (1932), S. 427–438.
- [18] *Schmehl, H.*: Das Potsdamer Schweresystem. Zum Gedenken an Friedrich J. Kühnen und Philipp F.P. Furtwängler. Forsch. und Fortschr. 16 (1940) 19/20, S. 220.
- [19] *Schüler, R., Harnisch, G., Fischer, H. und R. Frey*: Absolute Schwerbestimmungen mit Reversionspendeln 1968–1969. Veröff. ZIPE, Potsdam (1971) Nr. 10, 193 S.
- [20] Bericht über die Verhandl. der vom 23. bis 28. Sept. 1874 zu Dresden abgehaltenen Vierten Allg. Conf. der Europäischen Gradmessung. Berlin 1875, S. 93.
- [21] Verhandl. der vom 20. bis 29. Sept. 1875 in Paris vereinigten Permanenten Kommission der Europäischen Gradmessung. Berlin 1875, S. 78–81.