

Absolute Bestimmung der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam 1898 – 1904 und 1968 - 1969

Von Joachim Höpfner

Geodätisches Kolloquium am GFZ Potsdam, 22. Mai 2008

Absolute Bestimmung der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam 1898 – 1904 und 1968 – 1969

Von Joachim Höpfner

	Seite
1. Physikalische Grundlagen	3
2. Geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen	5
3. Abplattung der Erde und Schwerebestimmungen	10
4. Absolute Schwerebestimmungen mittels Reversionspendelapparat von Repsold	13
5. Zeit nach 1885	15
6. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch Kühnen und Furtwängler	19
6.1. Voruntersuchungen	19
6.2. Hauptmessungen	20
7. Andere Messungen und die weitere Entwicklung	30
8. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch Schüler, Harnisch, Fischer und Frey	31
8.1. Das 25-cm-Reversionspendelgerät	31
8.2. Das Quarzpendelgerät	37
8.3. Die Ergebnisse der Messungen	38
9. Vergleich von Ergebnissen	48
Literatur	52
Anhang: Numerische Angaben	54

1. Physikalische Grundlagen

Das Pendel

Es 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).

Pendelgesetze

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** $T = 2 \pi \sqrt{l / g}$, 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:

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

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:

$$g = 4 \pi^2 l / T^2$$

Verwendete Maßeinheiten für die Schwere

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

2. Geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen

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

1629 G. Galilei schrieb 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 (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** (Regler).

Fortsetzung:

2. Geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen

- 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.**
- 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 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 **Clairaut-Theorem** bestimmt die **Erdabplattung aus der Fliehkraft am Äquator sowie der Schwerkraft am Äquator und an den Polen.**

Fortsetzung:

2. Geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen

- 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. **Jean-Charles de Borda** (1733-1799, französischer Mathematiker und Physiker) stellte dafür die heute noch verwendete Formel auf.
- 1792** **Jean-Charles de Borda** und **Jean-Dominique Cassini** (IV, 1748-1845, französischer Physiker) benutzen für ihre Messungen ein **2-s-Fadenpendel**. Sie bestimmten erstmalig die Schwingungsdauer mit Hilfe der **Koinzidenzmethode**.
- 1811** **Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger** (1765-1831, deutscher Astronom, Mathematiker und Physiker) schlug das **Reversionspendel** vor.
- 1817** **Henry Kater** (1777-1835, englischer Wissenschaftler) baute **erstes Reversionspendel**.
- 1818** **H. Kater** baute **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 **Schwerebestimmungen 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.

Fortsetzung:

2. Geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen

- 1826/1827** **Friedrich Wilhelm Bessel** (1784-1846, deutscher Astronom, Mathematiker und Geodät) geht wieder zum **Fadenpendel** über, weil es **Schwierigkeiten** bei der Formgebung der Schneide und bei der Messung des Schneidenabstandes gab. Hauptschwierigkeit: Lufteinfluß. Schlußfolgerung: Dieser lässt sich besser durch ein Reversionspendel überwinden
- um 1845** **F. W. Bessel** gibt **Vorschläge für ein Reversionspendel**: Symmetrisch der Figur nach, auswechselbare Schneiden.
- 1849** **Sir George Gabriel Stokes** (1819-1903, irischer Mathematiker und Physiker) stellte **Untersuchungen über die Gestalt von Niveauflächen** an. Sein Ergebnis war, daß man über die ganze Erde verteilte Schwerewerte dazu benutzen kann, um 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.

Fortsetzung:

2. Geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen

- 1854** **Sir George Biddell Airy** (1801-1892, englischer Mathematiker und Astronom) führte **relative Pendelmessungen zur Bestimmung der mittleren Dichte der Erde** in einem Schacht (Teufenunterschied 450 m) aus. Die Unsicherheit der Uhrzeitbestimmung wurde durch Benutzung einer Pendeluhr für beide, gleichzeitig besetzte Meßpunkte vermindert. Als Ergebnis erhielt er für den Schwereunterschied 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**. Bestimmung des Schneidenabstandes zum ersten Male bei hängendem Pendel. Der benutzte Maßstab zeigte größere Unsicherheiten.

3. Abplattung der Erde und Schwerebestimmungen

1861 Johann Jacob Baeyer: Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mittel-europäischen Gradmessung. Berlin 1861

Abplattung der Erde

$\alpha = 1 : 299$ aus Breitengradmessungen

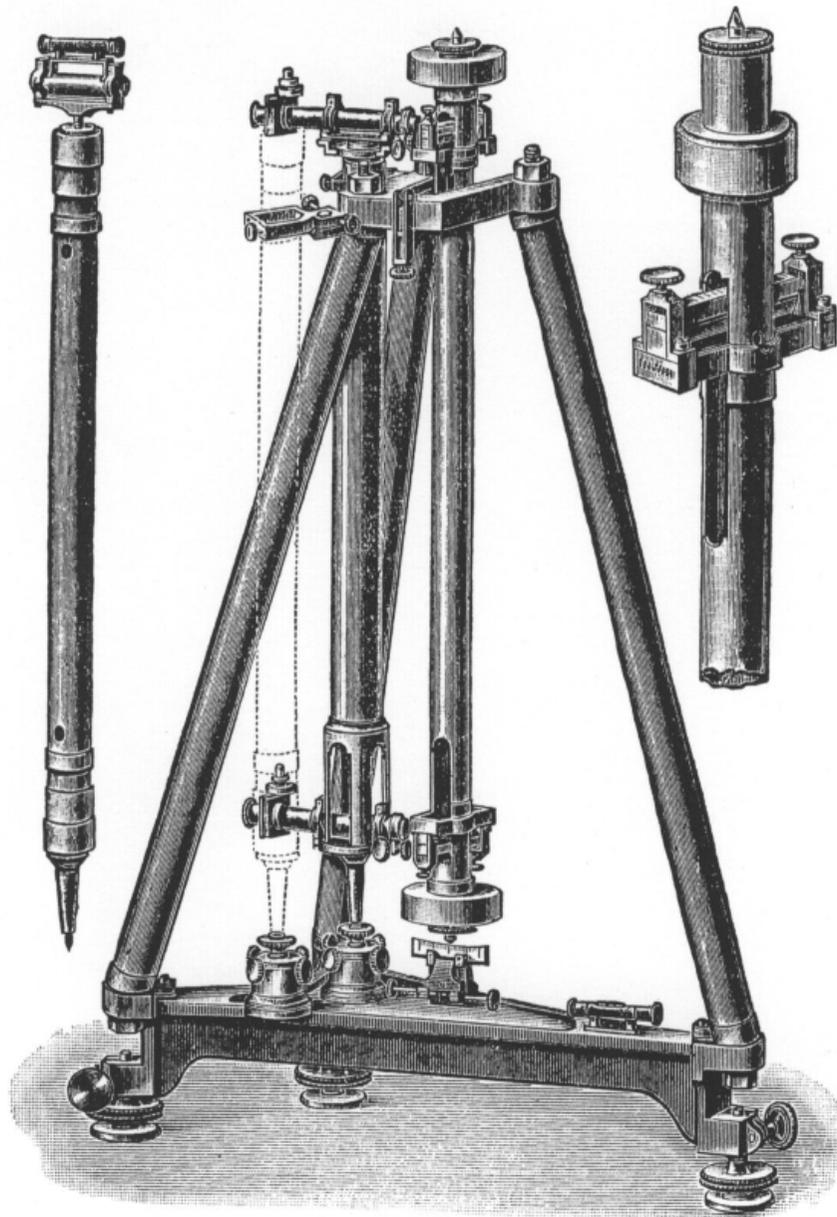
$\alpha = 1 : 289$ aus Schwerebestimmungen

Aus dieser Diskrepanz ergab sich als **Aufgabe der Mitteleuropäischen Gradmessung (M. E. G.)**, nicht nur Breitengradmessungen, sondern auch **Schwerebestimmungen zu veranlassen.**

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

1862 Bau eines Reversionspendelapparates zur Ausführung absoluter Schwerebestimmungen bei der Firma **Repsold** in Hamburg für Schweizer Gradmessungskommission

1869 Reversionspendelapparat von Repsold für Zentralbüro der Europäischen Gradmessung



Repsoldscher Pendelapparat

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



Ölgemälde von Stankiewicz am GFZ Potsdam

Johann Jacob Baeyer (1794-1885) Generalleutnant z. D. Dr. h. c.

- 1843 Leiter des trigonometrischen Büros im Generalstab
- 1857 Baeyer wird zur Disposition des Chefs des Generalstabs der preußischen Armee gestellt
- 1861 Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung
- 1862 Berliner Gründungskonferenz der Gradmessung
- 1866 Präsident des Zentralbüros der Gradmessung

Präsident des Geodätischen Instituts in Berlin von 1870 bis 1885

4. Absolute Schwerebestimmungen mittels Reversionspendelapparat von Repsold

1869 bis 1871 Ausführung von absoluten Schwerebestimmungen auf 10 Stationen in Preußen und Sachsen durch Zentralbüro der Europäischen Gradmessung und Geodätisches Institut

Bestimmung der Schwingungsdauer in 16 Kombinationen (Schneiden umgelegt und vertauscht, schweres Gewicht oben und unten)

1869 Markierung von Nulldurchgängen mittels **Taster**
Meßunsicherheit der Zeitdauer für 1000 Schwingungen: $1,5 \times 10^{-5}$
Genauigkeit der Schwerebestimmung: ± 7 mGal

1870 **Koinzidenzmethode**
Genauigkeit der Schwerebestimmung: ± 3 mGal

Bestimmung der Pendellänge vor und nach den Schwingungsbeobachtungen für jede Kombination unter Berücksichtigung des Schneidenbeleuchtungseffektes, Arbeit mit aufrechtem und umgekehrtem Maßstab

Ableitung des Uhrganges für Stationsuhr durch astronomische Zeitbestimmungen

Bestimmung des Schwerpunktes für jede Hauptkombination je einmal am Anfang und am Ende

Schwierigkeiten bei absoluten Schwerebestimmungen mittels des großen 1-s-Pendelapparates

1874 Bildung einer Pendelkommission mit Vorsitz: **Johann Jacob Baeyer** (1794-1885), Mitglieder: **Karl Christian Bruhns** (1830-1881), **Adolph Hirsch** (1830-1901), **Theodor v. Oppolzer** (1841-1886), **Christian Peters** (1806-1880) und **Theodor Albrecht** (1843-1915)

Aufgabe: Ermittlung eines sicheren und rationellen Verfahrens zur Messung in Schwerenetzen

Wichtige Erkenntnisse und Empfehlungen im Bericht von J. J. Baeyer sind:

- Verfälschung des Ergebnisses wegen **Mitschwingen des Stativs**
- Empfindlichkeit des Gerätes beim Transport
- 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** mit großer Sorgfalt 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 **Charles Sanders Peirce** (1839-1914, amerikanischer Philosoph, Physiker und Mathematiker) ermittelte den **Einfluß des Mitschwingens** des Repsoldschen Pendelstativs zu etwa 150 mGal.

Emile Plantamour (1815-1882, schweizerischer Astronom) fand danach, daß zudem der **Einfluß des Untergrundes** diesen Wert um 30 mGal verändern konnte.

1884 Absolute Bestimmung der Schwere in Wien durch Theodor v. Oppolzer (1841-1886)

1887 Konstruktion eines invariablen Einpendelapparates durch Robert D. v. Sterneck (1839-1910), Vorschlag von Baeyer wird weiter verfolgt

1892 Wiener Schweresystem wird zunächst benutzt, ab 1909 Potsdamer Schweresystem

5. Zeit nach 1885

ab 1876 Klinker-Backsteinbauten, errichtet im klassizistischen Stil nach Plänen von Oberbaudirektor Paul Spieker (1826-1896) auf dem Telegrafenberg bei Potsdam

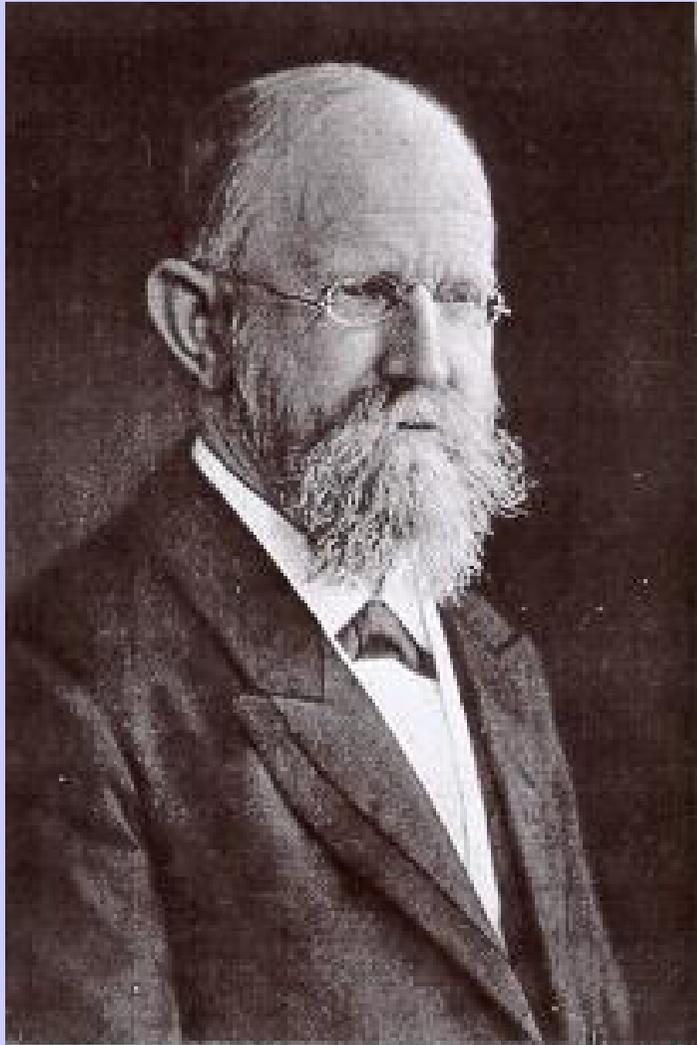
1876 bis 1879 Errichtung des Hauptgebäudes des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam

1885 Tod von J. J. Baeyer, ab 1886 Friedrich Robert Helmert (1843-1917) wurde sein Nachfolger

1889 bis 1892 Errichtung des Hauptgebäudes des Geodätischen Instituts Potsdam
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.

1892 Potsdamer Zeit für das Geodätische Institut beginnt

1898 bis 1904 Bestimmung des Absolutwertes der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam



Archivaufnahme

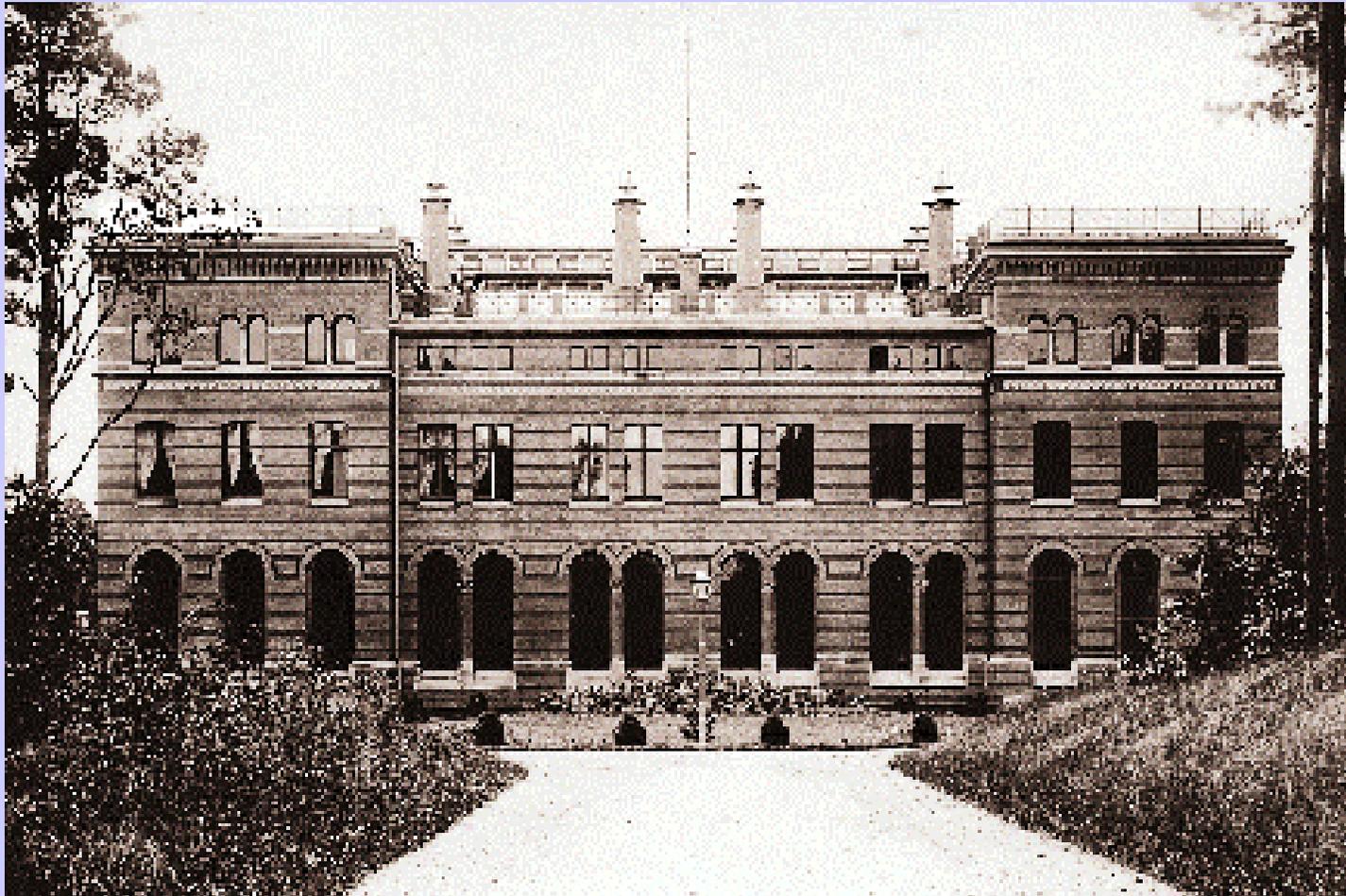
Friedrich Robert Helmert (1843-1917)
Prof. Dr. phil. Dr. Ing. e. h.

**Begründer der mathematischen und physikalischen
Theorien der modernen Geodäsie**

**Direktor des Geodätischen Instituts von 1886
bis 1917**

Hauptgebäude des Geodätischen Instituts Potsdam, heute Helmert-Haus des GFZ

Backsteinbau in klassizistischem Stil, errichtet von 1889 bis 1892; Treppenhaus mit Büsten von J. J. Baeyer (1794-1885), F. W. Bessel (1784-1846) und C. J. Gauß (1777-1855)

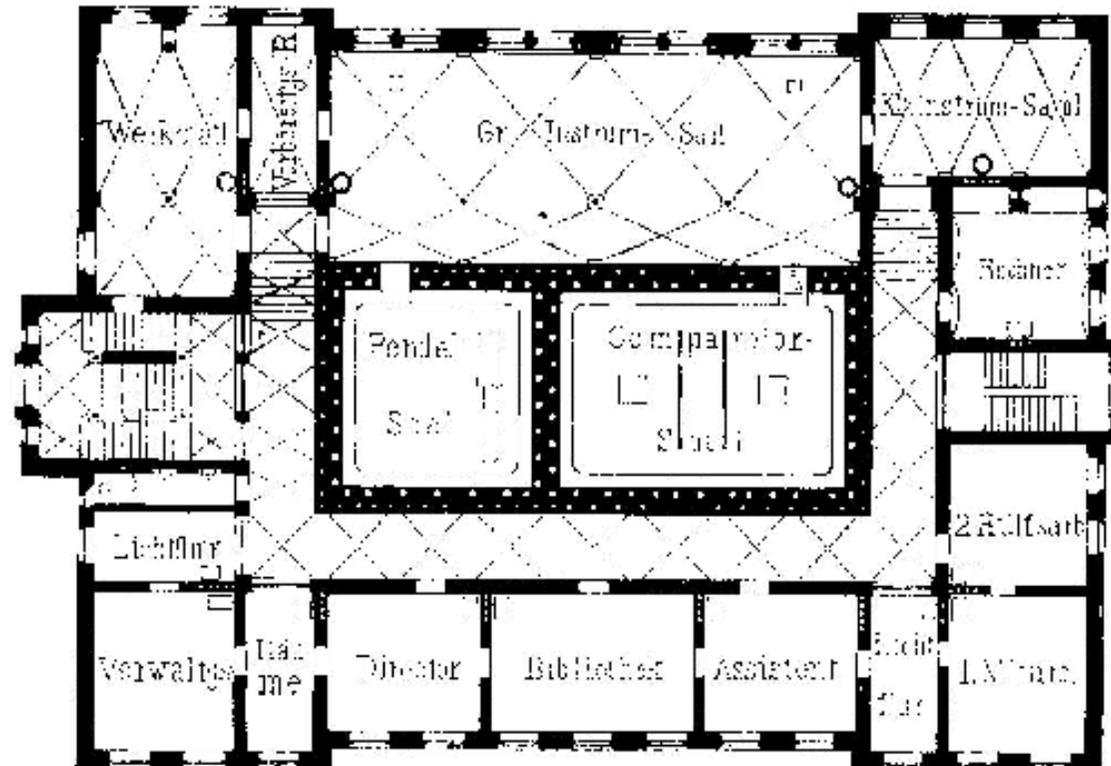


Archivaufnahme

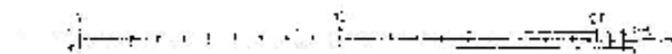
Schwerebestimmung von J. Höpfner

Grundriss vom Erdgeschoss.

Norden.



MAASSSTAB 1:500



6. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch Kühnen und Furtwängler

6.1. Voruntersuchungen

F. R. Helmert und **Richard Schumann** (1864-1945), später auch **Friedrich J. Kühnen** (1858-1940) und **Philipp Furtwängler** (1869-1940) stellten **Untersuchungen zur Verbesserung der Reversionspendelmethode** an.

1898 „**Beiträge zur Theorie des Reversionspendels**“ von **F. R. Helmert**
Helmert befaßte sich 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 **Ph. Furtwängler** entwickelte **grundlegende Formeln zum Mitschwingen**

6.2. Hauptmessungen

1898-1904 Bestimmung des Absolutwertes der Schwere mit Reversionspendeln im Pendelsaal des Geodätischen Instituts Potsdam durch **Friedrich Kühnen** und **Philipp Furtwängler**

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

1. Ein altes **Sekundenpendel** des GIP (erworben 1869, Masse 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 **Halbsekundenpendel** des GIP (erworben 1892, 3,53 kg)

Bei Vorversuchen zeigte ein **neuentwickeltes Sekundenpendel des GIP** stark elastische Biiegsamkeit und wurde deswegen **nicht weiter verwendet**. Ein **Fadenpendel** diente zur Kontrolle des Mitschwingens. Ferner gehörte zur Pendelausrüstung ein **Koinzidenzapparat nach Sterneck** und ein **neuer Maßstab**.

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 schwingen, 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, wurde eine **optische Koinzidenzmethode** verwendet.

Die Beobachtungen wurden nach den Methoden von Helmert reduziert, die in seinen „Beiträgen zur Theorie des Reversionspendels“ veröffentlicht sind:

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

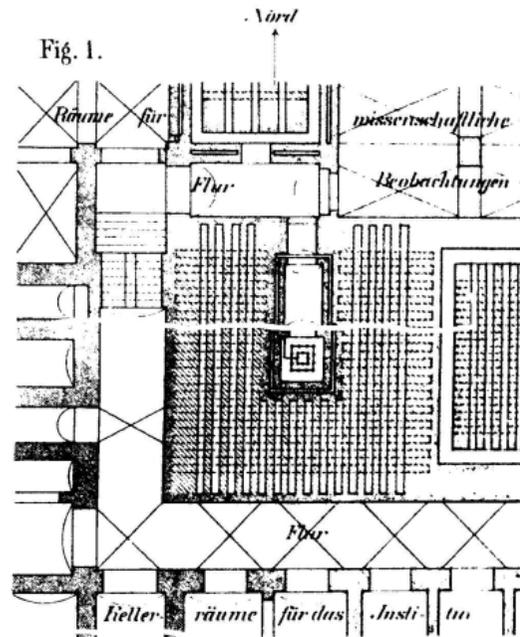
- wegen Aufhängung
- Amplitudenreduktion (Ausschlag)
- Temperaturreduktion
- Reduktion wegen variabler Luftdichte
- Reduktion auf Sternzeitsekunden (Uhrgang)
- wegen des Mitschwingens der Pendelunterlage (Formeln nach Furtwängler)
- wegen elastischer Biegung und Dehnung des Pendels und
- Reduktion wegen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

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

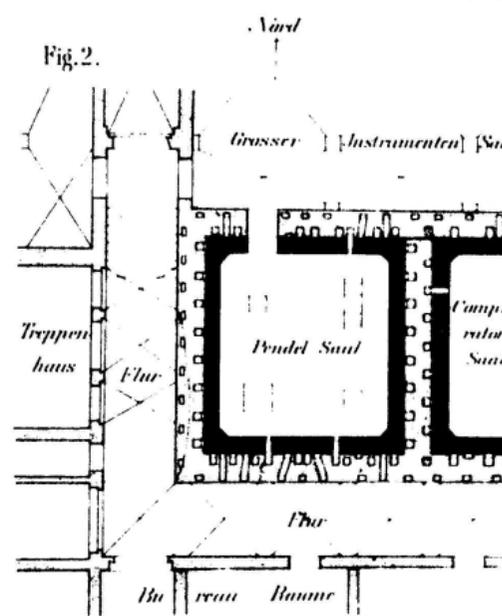
Länge des einfachen Sekundenpendels $(994,239 \pm 0,003)$ mm und damit **der Schwerewert**

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

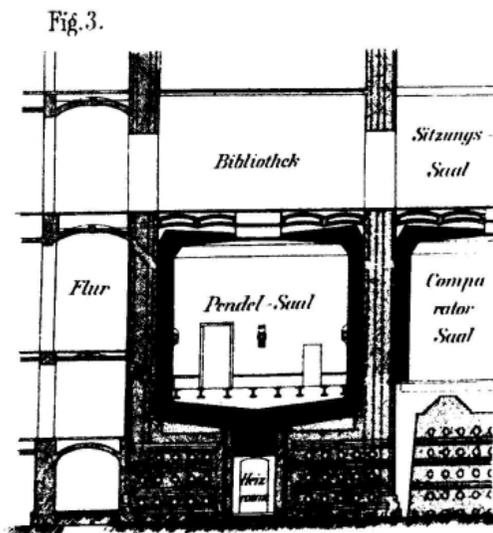
bezogen auf den Absolutpfeiler S0 mit den geographischen Koordinaten $52^\circ 22,86'$ nördlicher Breite und $13^\circ 04,06'$ östlicher Länge und die Höhe 87,00 m im Pendelsaal.



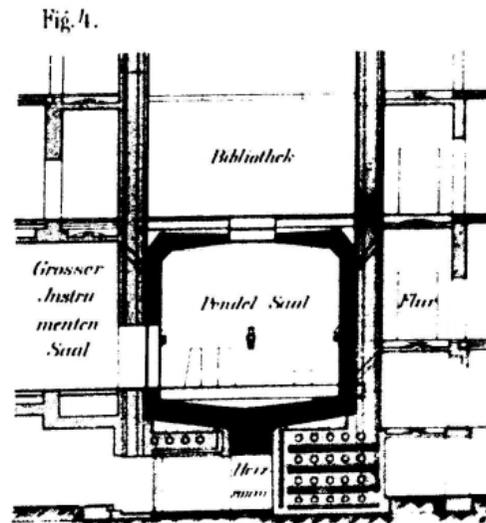
Horizontalschnitt durch das Keller-geschofs.



Horizontalschnitt durch das Erd-geschofs.

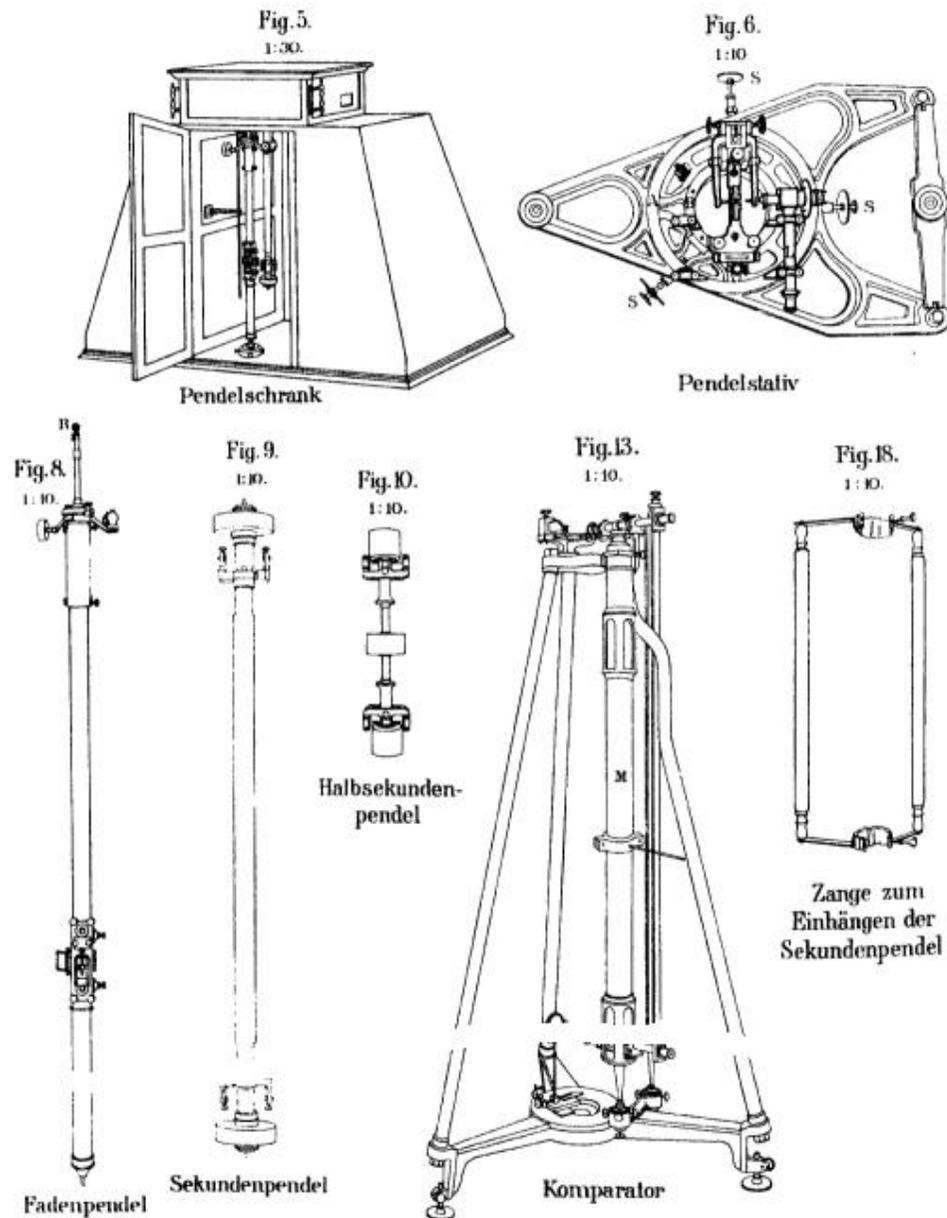


Vertikalschnitt West-Ost.



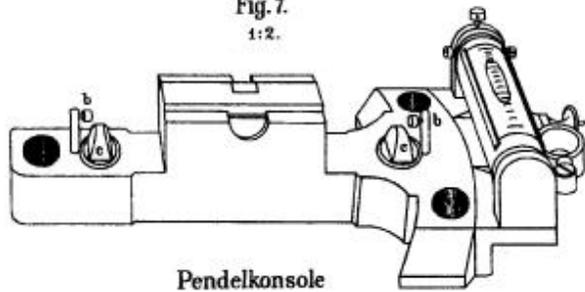
Vertikalschnitt Nord-Süd

Figuren, die die baulichen Verhältnisse des Pendelsaales veranschaulichen



Figuren, die die zur Bestimmung der absoluten Schwere benutzten Geräte veranschaulichen

Fig. 7.
1:2.



Pendelkonsole

Fig. 11.
1:2.

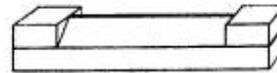
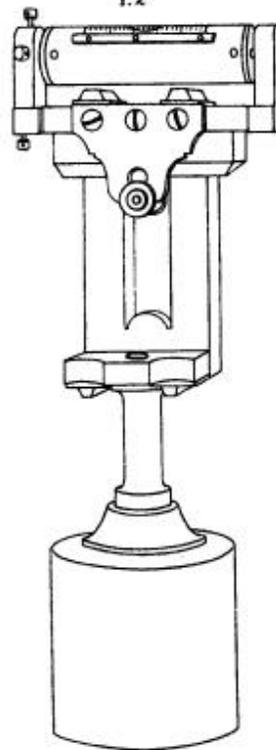


Fig. 12.
1:2.



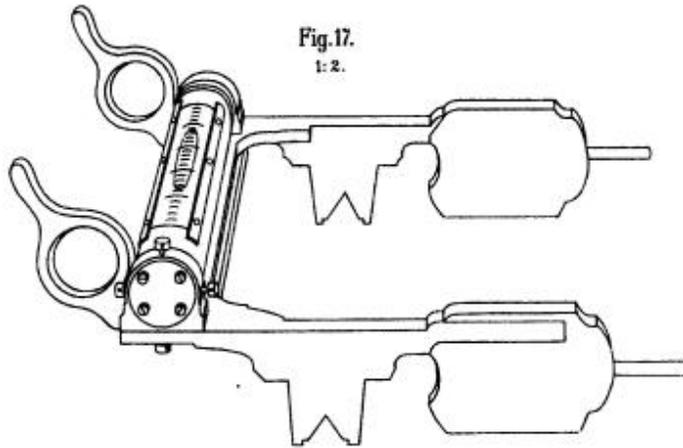
Schneide

Fig. 16.
1:2.



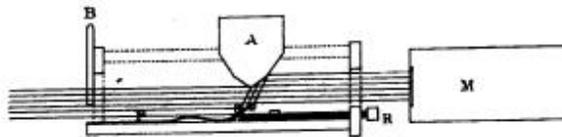
Hauptlibelle

Fig. 17.
1:2.



Hilfslibelle

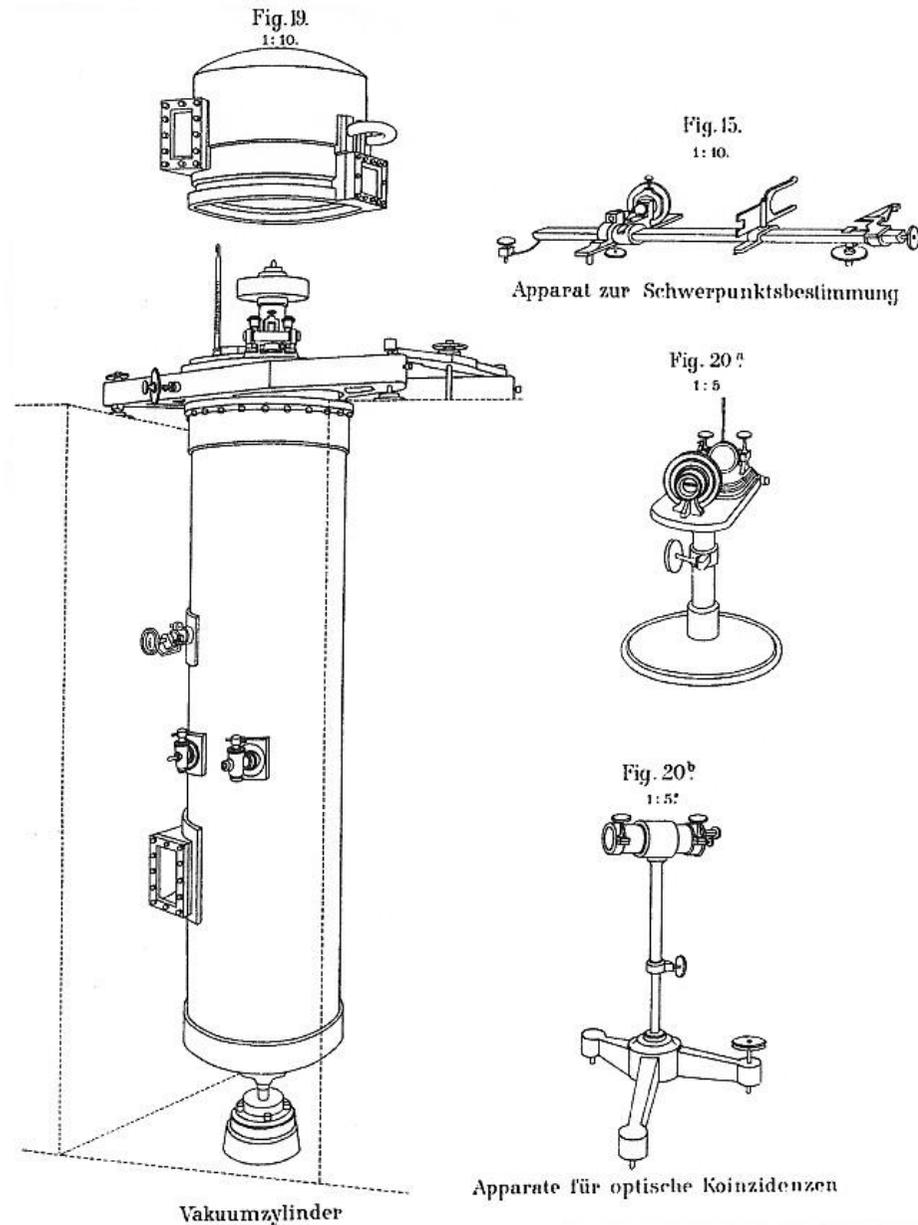
Fig. 14.



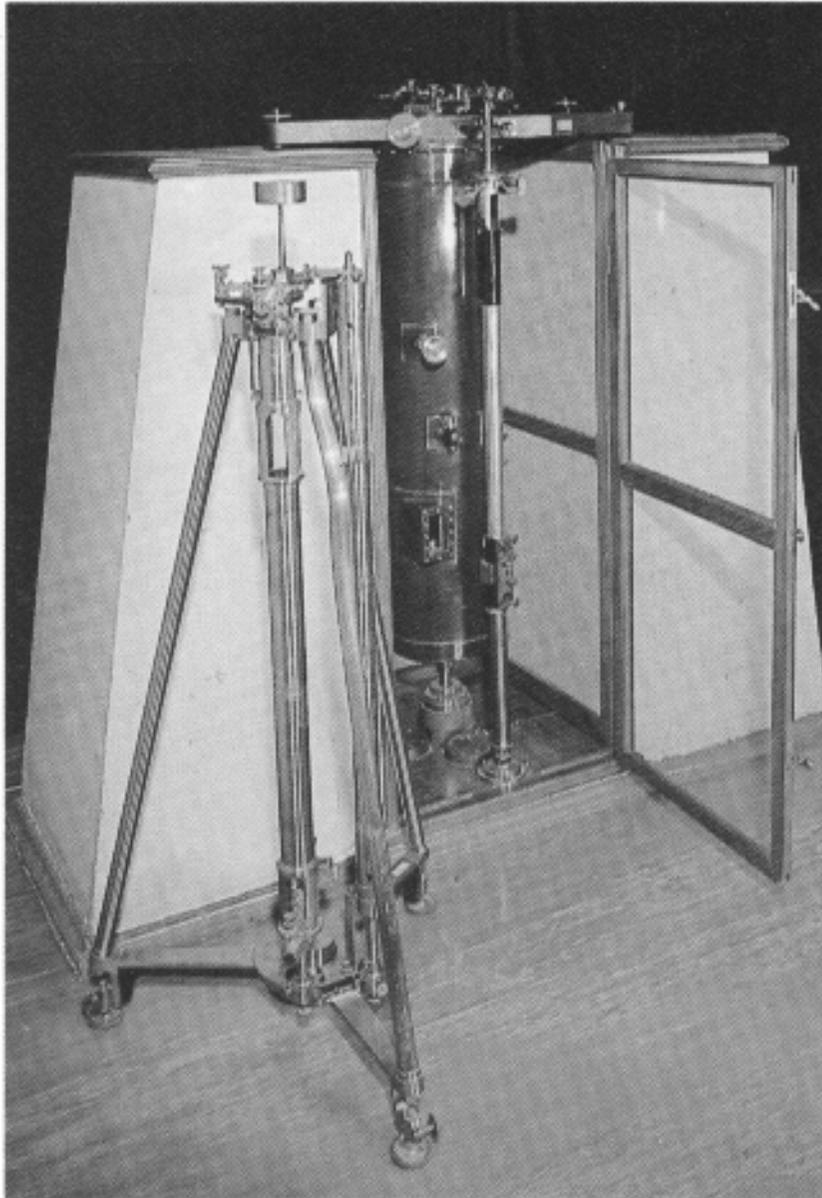
Beleuchtungseinrichtung
(schematisch)

Fortsetzung:

Figuren, die die zur Bestimmung der absoluten Schwere benutzten Geräte veranschaulichen



Fortsetzung:
Figuren, die die zur Bestimmung der absoluten Schwere benutzten Geräte veranschaulichen



Pendelapparat

Stativ auf Doppelpfeiler S0 mit im
Vakuumzylinder eingehängtem Pendel
im geöffneten Pendelschrank im
Pendelsaal

Vorn, links:

Komparator für Längenmessungen

VERÖFFENTLICHUNG
DES KÖNIGL. PREUSZISCHEN GEODÄTISCHEN INSTITUTES

NEUE FOLGE No. 27

BESTIMMUNG
DER
ABSOLUTEN GRÖSZE DER SCHWERKRAFT
ZU
POTSDAM

MIT REVERSIONSPENDELN

VON

PROF. DR. F. KÜHNEN UND PROF. DR. PH. FURTWÄNGLER



← Acc. 1162



BERLIN

DRUCK UND VERLAG VON P. STANKIEWICZ' BUCHDRUCKEREI
1906

Prof. Dr. Friedrich Jacob Kühnen (1858-1940)



12. 05. 1858 Geboren in Brühl bei Köln

Studium der Mathematik, Physik und Geodäsie in Bonn, Paris, Göttingen, Berlin, Genf und Marburg

1888 Promotion in Marburg mit der Dissertation „Über die Galoissche Gruppe der Gleichung 27. Grades, von welcher die Geraden auf der allgemeinen Fläche dritter Ordnung abhängen“

Danach 3 Jahre Assistent für physikalische Arbeiten am Psychologischen Institut der Universität Marburg

1891-1923 am Geodätischen Institut Potsdam tätig, zuerst als Mitarbeiter und später als Geheimer Regierungsrat, Abteilungsvorsteher und Professor

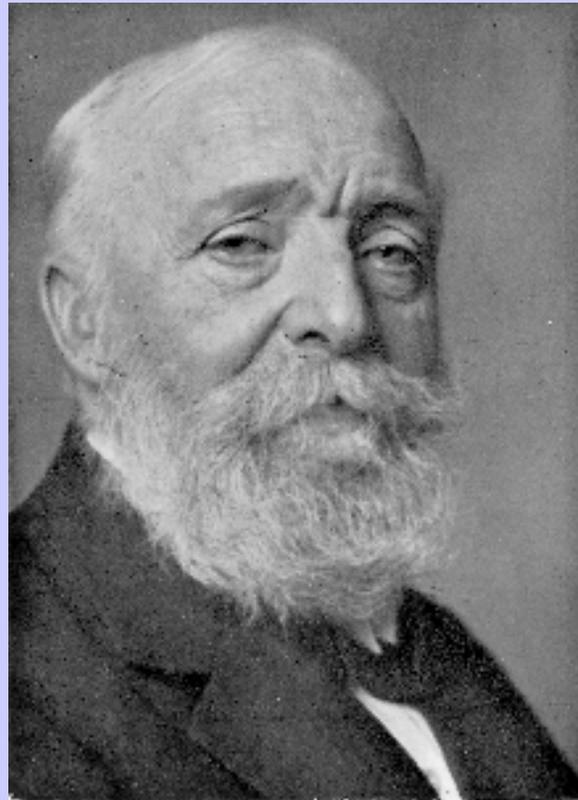
1896-1904 Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft mit Reversionspendeln (zusammen mit Philipp Furtwängler)

Weitere bedeutsame Arbeiten betrafen:

- Instrumentelle Entwicklungen für relative und absolute Schweremessungen auf dem Lande und auf See
- Konstruktion eines 4-Meter-Komparators zur Eichung von Maßstäben und Basismessgeräten
- Ausgleichung der europäischen Nivellements zwischen Nord- und Ostsee, dem Atlantischen Ozean und dem Mittelmeer
- Bau einer selbsttätig rechnenden Gezeitenmaschine, die für die Schifffahrt unentbehrlich wurde.

8. 01. 1940 Gestorben in Münster / Westfalen

Prof. Dr. Philipp Friedrich P. Furtwängler (1869-1940)



Ph. Furtwängler

Bild: Archiv der Universität Wien

21. 04. 1869 Geboren zu Elze i. Hann.

Studium der Mathematik und Physik in Göttingen

1896 Promotion in Göttingen mit einer Dissertation zur Theorie der in Linearfaktoren zerlegbaren ganzzahligen ternären kubischen Formen

1899 bis 1904 Assistent und wissenschaftliche Mitarbeiter am Geodätischen Institut zu Potsdam
Bestimmung der absoluten Größe der Schwerkraft mit Reversionspendeln (zusammen mit Friedrich J. Kühnen)

1904 bis 1912 ordentlicher Professor an der Landwirtschaftlichen Akademie Bonn und
Ab 1907 an der Technischen Hochschule Aachen und
Ab 1910 ordentlicher Professor an der Landwirtschaftlichen Akademie Bonn

1912 bis 1938 ordentlicher Professor der Mathematik an der Universität Wien

19. 05. 1940 Gestorben in Wien

1909 bis 1971 Schwerewert weltweit verwendet als internationaler Bezugswert des **Potsdamer Schweresystem**.

1932 **Heinz Schmehl** (1900-1944) gelang die **geschlossene Integration des Furtwänglerschen Ausdrucks**

7. Andere Messungen und die weitere Entwicklung

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

1936 bis 1938 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 Schweremessungen 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 begannen 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.

8. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam durch Schüler, Harnisch, Fischer und Frey

1956 Vorarbeiten für die Messungen begannen auf Initiative und unter Leitung von **Karl Reicheneder** (1903-1981, Physiker)

Es wurden **zwei Meßeinrichtungen mit Reversionspendeln** entwickelt:

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

Bei beiden Geräten wurde das **Zweipendelverfahren** angewandt.

8.1. Das 25-cm-Reversionspendelgerät

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

Masse der Pendel: 4 kg

Doppel-T-Förmiges Stativ mit vier Lagerflächen, die den Pendelschneiden zugeordnet sind

Reversion: Drehung der Pendel im **Vakuumbehälter** zusammen mit dem Stativ, wobei Vakuum von etwa 1×10^{-4} Torr erhalten bleibt

Schneiden und Lagerflächen sind auswechselbar für **verschiedene Materialpaarungen (Achat und Stahl)**

Messung von Schwingungsdauern für beide Pendel mit zwei getrennten elektronischen Zählern
Vorwahl der Anzahl von Pendelschwingungen: 1000 Schwingungen

Fortsetzung:

8.1. Das 25-cm-Reversionspendelgerät

Bestimmung der Pendellänge (Abstand der einander zugekehrten Schneidenkanten)

- **Interferometrischer Vergleich der Schneidenrückflächen mit zwei Quarzetalons**, die im Vakuumbehälter neben den Pendeln angeordnet sind, und
- **Messung der Schneidenhöhen auf einem Interferenzkomparator** außerhalb des Pendelgerätes
Länge in Arbeitslage, zum Längenvergleich keine Belüftung nötig

Schwingzeitmessungen

Beginn der Messungen, indem der Schwingungsvorgang elektromagnetisch ausgelöst wird; Schwingungsamplituden betragen etwa $14'$ und werden photographisch registriert.

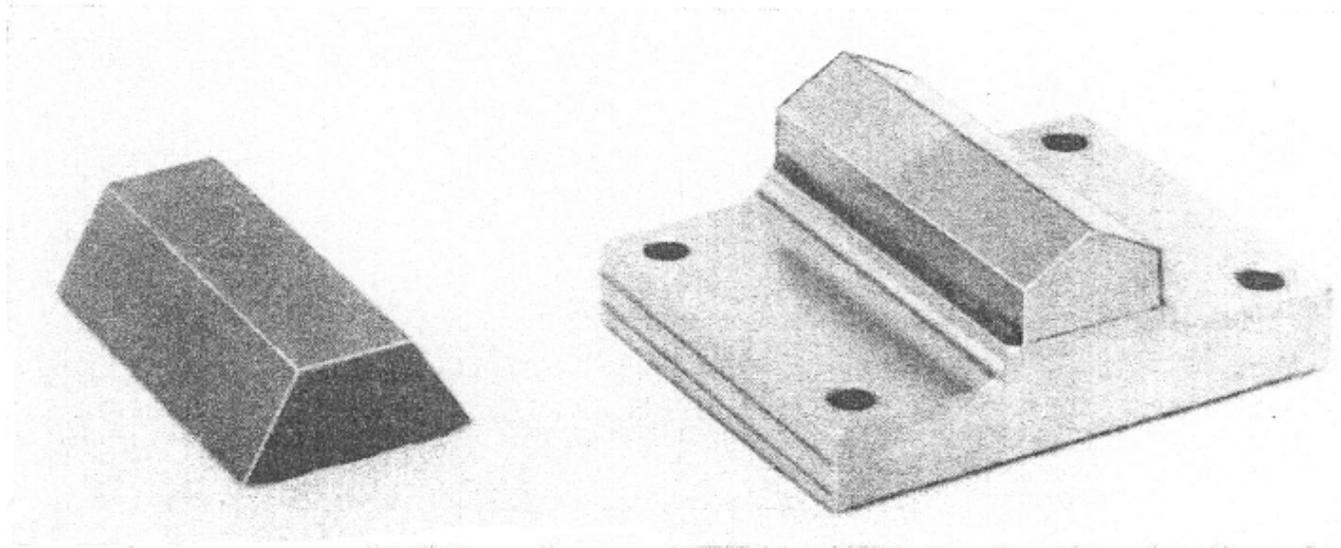
Phasendifferenz zwischen beiden Pendeln weicht beim Start um nicht mehr als 4° vom Sollwert 180° ab.

Schwingzeitmessungen sind wegen **unterschiedlicher Krümmungsradien** der Schneiden **in mindestens zwei Schneidenlagen** auszuführen.

Berücksichtigung des Mitschwingens des Stativs wegen großem Mitschwingkoeffizienten (geringe mechanische Stabilität wegen Revertierbarkeit)

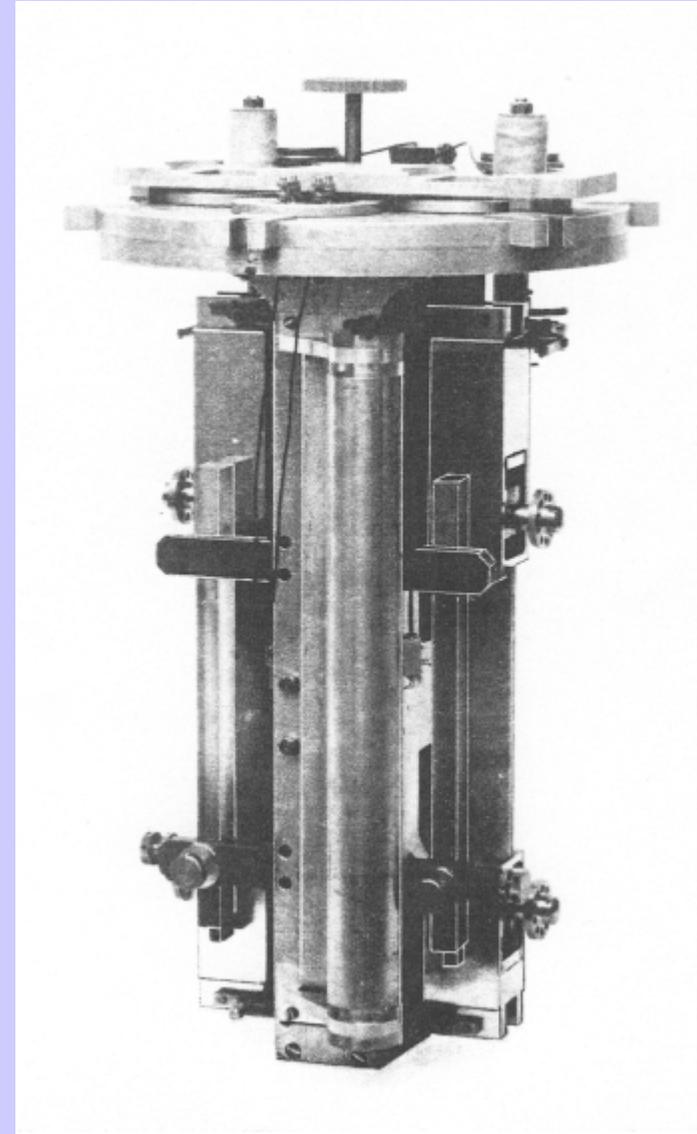
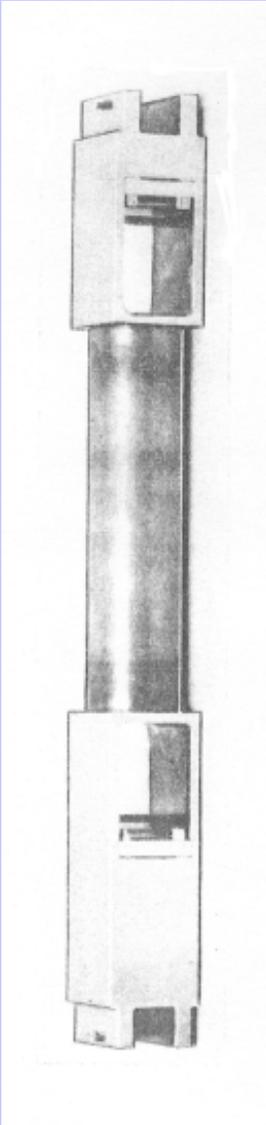
Schwingzeit- und Längenmessungen sind wegen des großen Temperaturkoeffizienten von Messing **sehr stark temperaturabhängig: Thermometerpendel im Gerät**

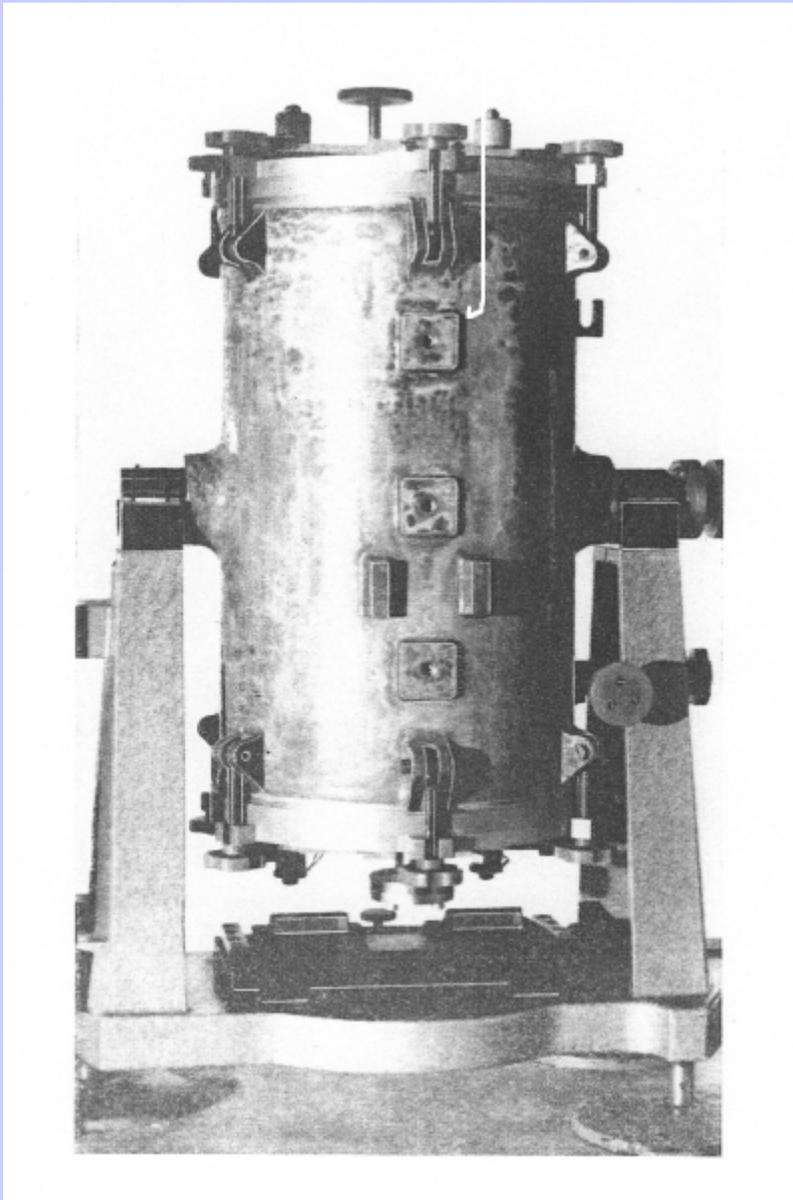
Temperaturänderung von $0,02$ Grad ruft eine Längenänderung von $0,1 \mu\text{m}$ hervor



Lagerfläche (links) und Schneide mit Grundkörper (rechts)

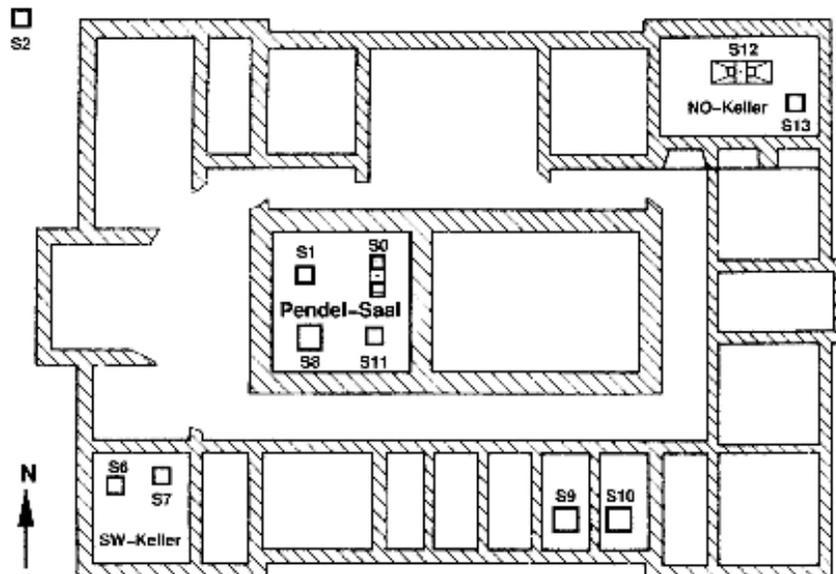
**Pendel (links) und Innenansicht (rechts)
des 25-cm-Reversionspendelgerätes**





**25-cm-Reversionspendelgerät
auf dem Pfeiler S8 im Pendelsaal**

Gravimetrische Anschlußpunkte im Hauptgebäude Mit näheren Informationen



S0 Doppelpfeiler, auf dem KÜHNEN und FURTWÄNGLER ihre Messungen mit Reversionspendeln zwischen 1898 und 1904 durchgeführt haben

S8, S1 und S11 Pfeiler, die SCHÜLER, HARNISCH, FISCHER und FREY für den Aufbau ihrer 25-cm-Reversionspendel-Meßanlage 1968 und 1969 verwendeten

S8 Pfeiler, auf dem das 25-cm-Reversionspendelgerät aufgestellt wurde

S1 Pfeiler, auf dem Teile der Schwingzeitmeßanlage aufgebaut wurden

S11 Pfeiler, auf dem Teile der Längenmeßanlage aufgebaut wurden

S12 Doppelpfeiler, auf dem SCHÜLER, HARNISCH, FISCHER und FREY für ihre Messungen das Quarzpendelgerät 1968 und 1969 aufgestellt haben

S2 Granitplatte vor dem Gebäude, Anschlußpunkt für Gravimetermessungen

S6, S7, S9, S10 und S13 weitere Pfeiler

8.2. Das Quarzpendelgerät

Messungen mit drei Reversionspendelpaaren verschiedener Länge, aber gleicher Masse

Die reduzierten Pendellängen betragen 37,5 cm, 50 cm und 75 cm.

Material und Form der Pendel:

- **optisches Quarzglas** bis auf kleine Abstimmuschrauben
- **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

Der **Pendelapparat** ruht auf einem massiven Doppelpfeiler aus Granit (keine Mitschwingeffekte sind zu berücksichtigen). Zu beiden Seiten des Pendelapparates: Autokollimationseinrichtung zur Justierung der Pendel und zur Bestimmung der Pendelamplitude (etwa 20°).

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

Schwingzeitmeßanlage

- unter dem Pendelapparat angeordnete **Autokollimationseinrichtung**
- mehrere **elektronische Zähler und Meßwertdrucker**

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

Fortsetzung:

8.2. Das Quarzpendelgerät

Genauigkeit der Messungen der Schwingungsdauer

Bei einer Meßdauer von 1000 Pendelschwingungen erhält man die Schwingungsdauer auf 10^{-8} s genau.

Quarz hat nur eine geringe Wärmeausdehnung, deshalb ist der **Temperatureinfluß nur gering** und kann sicher erfaßt werden.

Längenmessung der Pendel

Verwendung eines **Vakuuminterferometers** mit einem Strahlengang nach **Dowell**, wobei der **Abstand der Schwingflächen** der Pendel **mit Quarzendmaßen** entsprechender Länge verglichen werden (Ansprengen von Planspiegeln nötig)

Erreichte Vergleichsgenauigkeit: 0,01 bis 0,02 μm

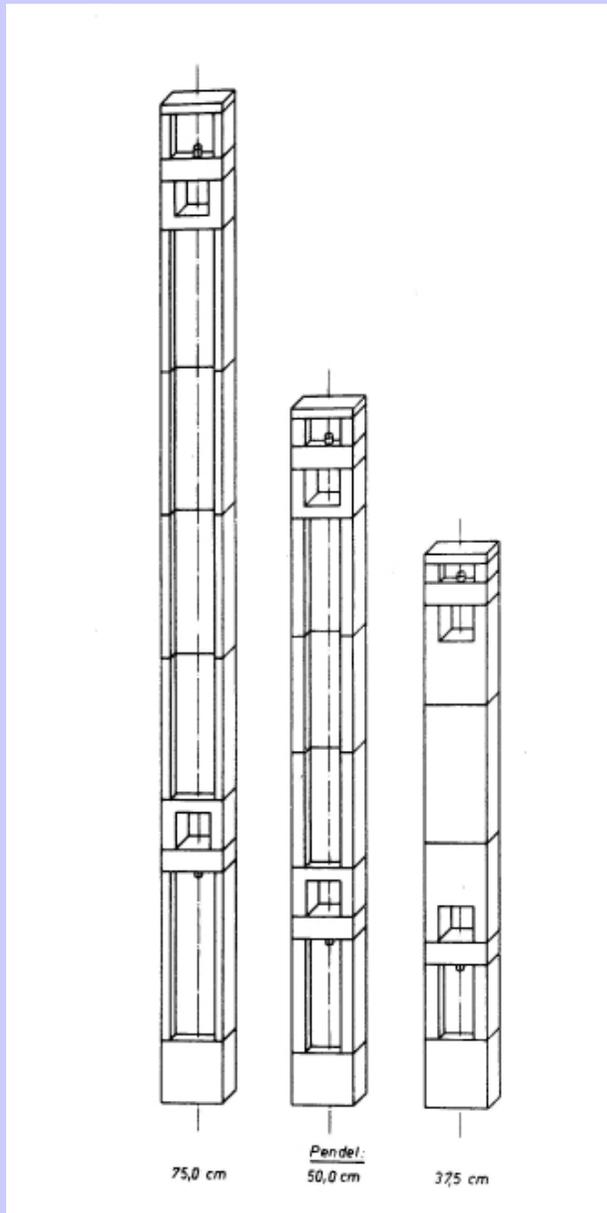
8.3. Die Ergebnisse der Messungen

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

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

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

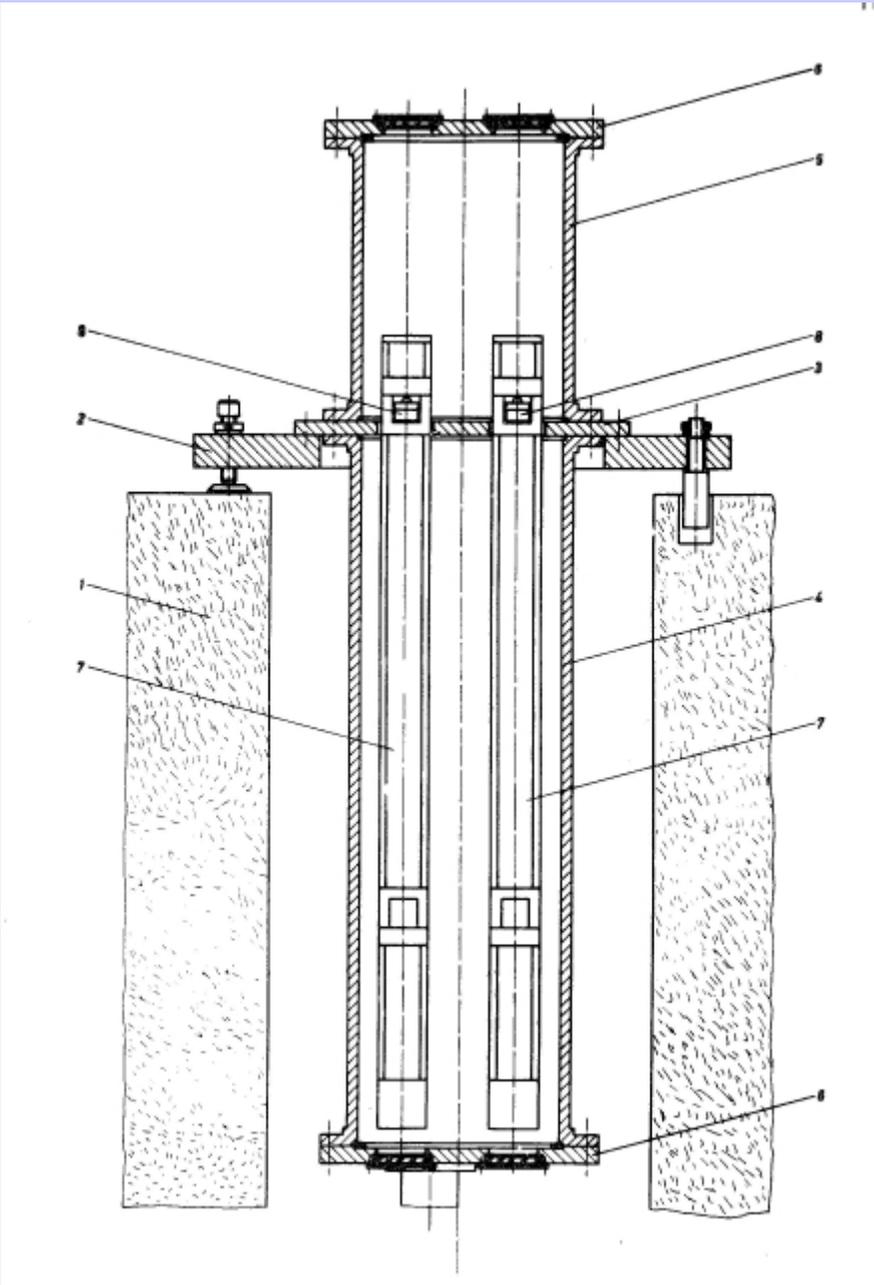
Die Schwerewerte beziehen sich auf den Doppelpfeiler S0 im Pendelsaal und die Bezugshöhe 87,00 m.



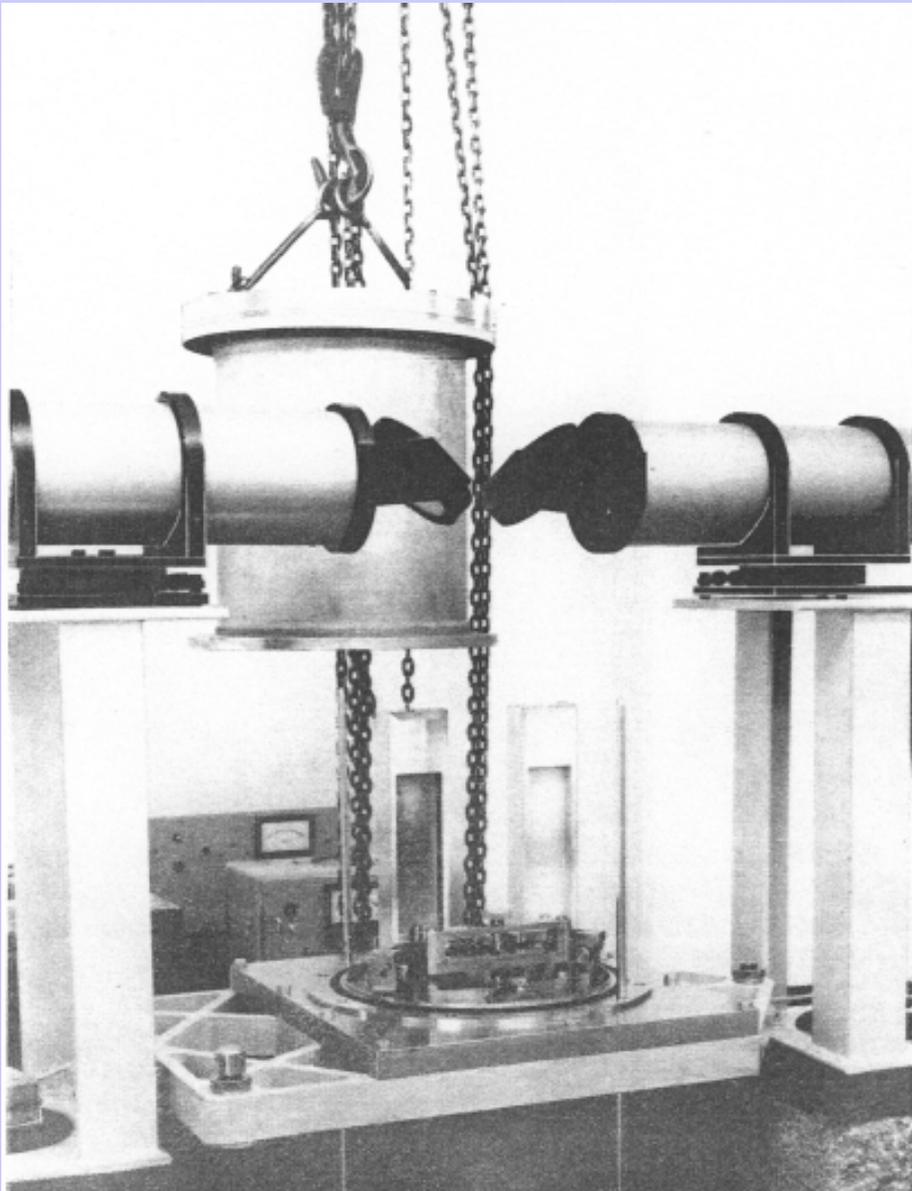
Quarzpendel

Mit Längen von 75,0 cm, 50,0 cm und 37,5 cm

Quarzpendelgerät



Schwerebestimmung von J. Höpfner



Quarzpendelgerät, geöffnet



**Quarzpendelgerät
auf dem Pfeiler S12 im NO-Keller**

Aufnahme: L. Hannemann

DEUTSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN

Forschungsbereich Kosmische Physik

ZENTRALINSTITUT PHYSIK DER ERDE

Veröffentlichungen des Zentralinstituts Physik der Erde

Nr. 10

**Absolute Schweremessungen
mit Reversionspendeln in Potsdam
1968 - 1969**

von

Rudi Schüler
Günter Harnisch
Harald Fischer
Reiner Frey

Als Manuskript gedruckt
Potsdam 1971

Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Rudi Schüler (1925-2004)



- 1. Okt. 1925 Geboren in Freest (Kreis Wolgast)
- 1932 – 1940 Besuch der Volksschule in Freest und Wolgast
- 1940 – 1943 Ausbildung zum Metallflugzeugbauer
- 1943 – 1945 Wehrdienst
- 1947 – 1949 Besuch der Vorstudienchule in Greifswald
- 1949 – 1955 Physikstudium an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
Abschluss des Studiums als Diplom-Physiker
- 1955 – 1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut Potsdam,
ab 1969 Bereich Geodäsie und Gravimetrie des Zentralinstituts für
Physik der Erde

Entwicklung eines leistungsfähigen 24-m-Interferenzkomparators für genaueste Längenvergleiche und
Realisierung einer physikalischen Konzeption von Prof. Dr. K. Reicheneder für ein transportables Gerätesystem mit Reversionspendeln zur Messung des Absolutbetrages der Schwerebeschleunigung

1968 Promotion zum Dr. rer. nat. an der Karl-Marx-Universität Leipzig mit der Dissertation „Die Störung der Bewegung von Schwerependeln durch ihre Lagerung“

Entwicklung von Meßanordnungen und -geräten sowohl bei der Neubestimmung des Potsdamer Schwerewertes als auch in Form eines Interferenzkomparators für Präzisionslängenvergleiche im Entfernungsbereich einiger Kilometer

Untersuchungen der Anwendung dynamisch wirksamer Prinzipien zur Messung geodätischer Größen

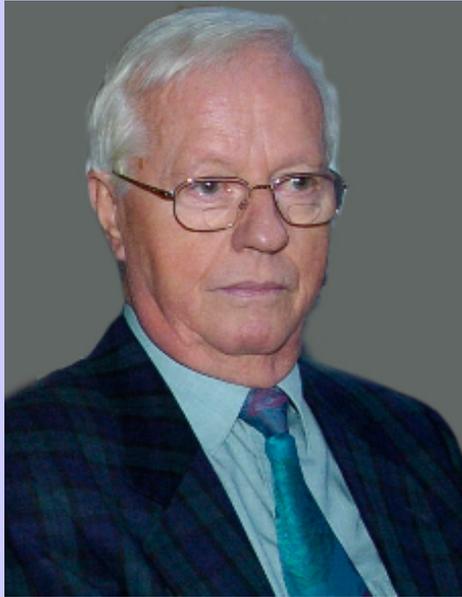
26. Dez. 2004 Gestorben in Potsdam

Diplom- Geophysiker Günter Harnisch



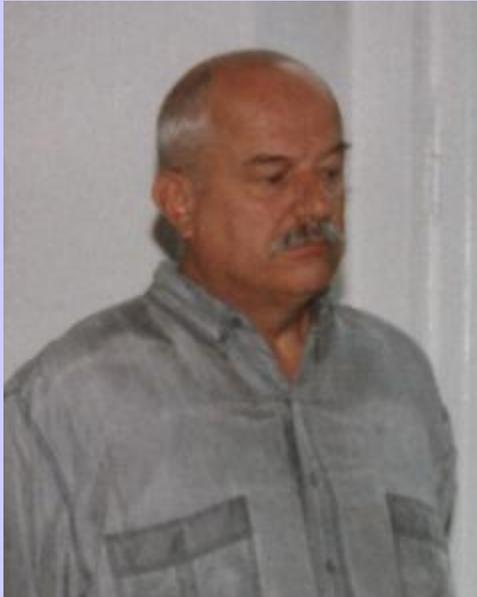
- 1936 Geboren in Altenburg/Thüringen
- 1942 – 1954 Schulbesuch in Bernburg/Saale und in Blankenburg/Harz
- 1954 Abitur in Blankenburg/Harz
- 1954 – 1956 Studium der Geophysik an der Humboldt-Universität in Berlin
- 1956 – 1959 und an der Bergakademie in Freiberg/Sachsen
- 1959 Abschluss des Studiums als Diplom-Geophysiker
- 1959 – 1963 Mitarbeiter am Deutschen Amt für Maß und Gewicht in Berlin.
Arbeiten zur Vorbereitung einer absoluten Schweremessung nach der Methode des freien Falls
- 1964 – 1991 Mitarbeiter am Geodätischen Institut Potsdam, ab 1969 Bereich Geodäsie und Gravimetrie des Zentralinstituts für Physik der Erde
- 1964 – 1977 In der Abteilung Gravimetrie Arbeiten zur absoluten Schwere-messung mit Reversionspendeln, zur Präzisionsgravimetrie und zur geophysikalischen Interpretation rezenter Erdkrustenbewegungen
- 1977 – 1990 Im Bereich Fernerkundung Arbeiten zur Auswertung photographischer Multispektralaufnahmen (Multispektralkamera MKF-6) und von Scanneraufnahmen (TIROS/NOAA, Landsat). Arbeiten zur Digitalen Bildverarbeitung und Digitalkartographie (Automatisiertes Kartographisches System)
- 1991 Bis zur Schließung des Zentralinstituts wieder Mitarbeiter in der Abteilung Gravimetrie
- 1992 – 2001 Mitarbeiter im Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG), ab 1998 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt a.M. Arbeiten zur Auswertung der Aufzeichnungen von Supraleit-gravimetern

Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Harald Fischer



- 1939 Geboren in Taucha bei Leipzig
- 1945 bis 1953 Besuch der Grundschule und
- 1953 bis 1957 der Geschwister-Scholl-Oberschule in Taucha
- 1957 bis 1962 Physikstudium an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
Abschluss als Diplomphysiker
- 1962 bis 1991 Wissenschaftlicher Assistent bzw. Mitarbeiter im damaligen
Geodätischen Institut Potsdam, das 1969 als Bereich II in das
Zentralinstitut für Physik der Erde einging
- Bis 1969 Konzeptionelle und messtechnische Mitarbeit bei der Neubestimmung
des absoluten Schwerewertes in Potsdam mittels Reversionspendel
- 1968 Promotion zum Dr. rer. nat. an der Karl-Marx-Universität Leipzig
mit dem Thema „Über den Einfluß elektrostatischer Felder auf die
Periode von Schwerependeln“
- 1969 bis 1974 Mitwirkung bei der Konzeption und dem Aufbau einer funktionstüchtigen Laserradarstation
(1.Generation) in Potsdam
- Ab 1974 Verantwortlich für die Mess-, Steuer- und Empfangselektronik der folgenden 2. und
3. Generation der Potsdamer LR-Stationen und der modernisierten Station in Santiago de Cuba
- 1985 bis 1988 Konzeption und Inbetriebnahme eines auf automatischen Betrieb umgerüsteten Zenitteleskops
mit einem Photomultiplier als Lichtsensor unter Nutzung eines Rechnersystems vom
Kernforschungszentrum Rossendorf
- 1992 bis 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im neu gegründeten GeoForschungsZentrum (GFZ)
Weiterentwicklungen an der Station Potsdam-2 und Konzeption der elektronischen
Komponenten für die neue Station Potsdam-3 bis zur Inbetriebnahme

Dipl.-Ing. Reiner Frey



Geboren im Jahre 1938

Studium der Geodäsie an der Moskauer Geodätischen Hochschule (MIIGAiK)
Abschluss als Diplomingenieur für Geodäsie

1962 bis 1991 Wissenschaftlicher Assistent bzw. Mitarbeiter im damaligen
Geodätischen Institut Potsdam, das 1969 als Bereich II in das Zentralinstitut
für Physik der Erde einging

Bis 1974 In der Abteilung Gravimetrie Arbeiten zur absoluten Schweremessung
mit Reversionspendeln und zur Rayonierung durch komplexe Analyse gravime-
trischer und magnetischer Anomalienfelder

9. Vergleich von Ergebnissen

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

$g = (981\,260,1 \pm 0,3) \text{ mGal}$ Gesamtergebnis der Messungen 1968 - 1869

Der Vergleich mit den Ergebnissen anderer moderner Absolutgravimeter zeigt, daß der neue Schwerewert **keinen systematischen Fehler innerhalb der erreichten Genauigkeit** enthält.

1976 bis 1995 Messungen mit Fallgravimetern am Potsdamer Institut

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

Die Schwerebeschleunigung ist orts- und zeitabhängig.

Ortsabhängigkeit: Höhe, Abplattung der Erde durch Erdrotation und Massenverteilung im Erdkörper **(Bei mGal-Einheiten sind das fünf Stellen vor dem Komma!)**

Zeitabhängigkeit: Gezeiten der festen Erde, Luftdruck, Ozean, Polbewegung, Grundwasser, Bodenfeuchte und Höhenänderungen **(Bei mGal-Einheiten sind das bis vier Stellen nach dem Komma!)**

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.

Tabelle 1. Absolute Schweremessungen in Potsdam

Jahr	Autoren	Gerät	Ergebnis in mGal (1 mGal = 10^{-5} m/s ²)
1898-1904	Kühen und Furtwängler	Reversionspendel	981 274 ± 3
1968-1969	Schüler et al.	Reversionspendel	981 260,1 ± 0,3
1976, 1978, 1980 1983, 1986	Arnautov, Boulanger et al.	Laserfallgravimeter GABL	981 260,02 ± 0,01
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.

Absolute Schwerebestimmungen in Potsdam

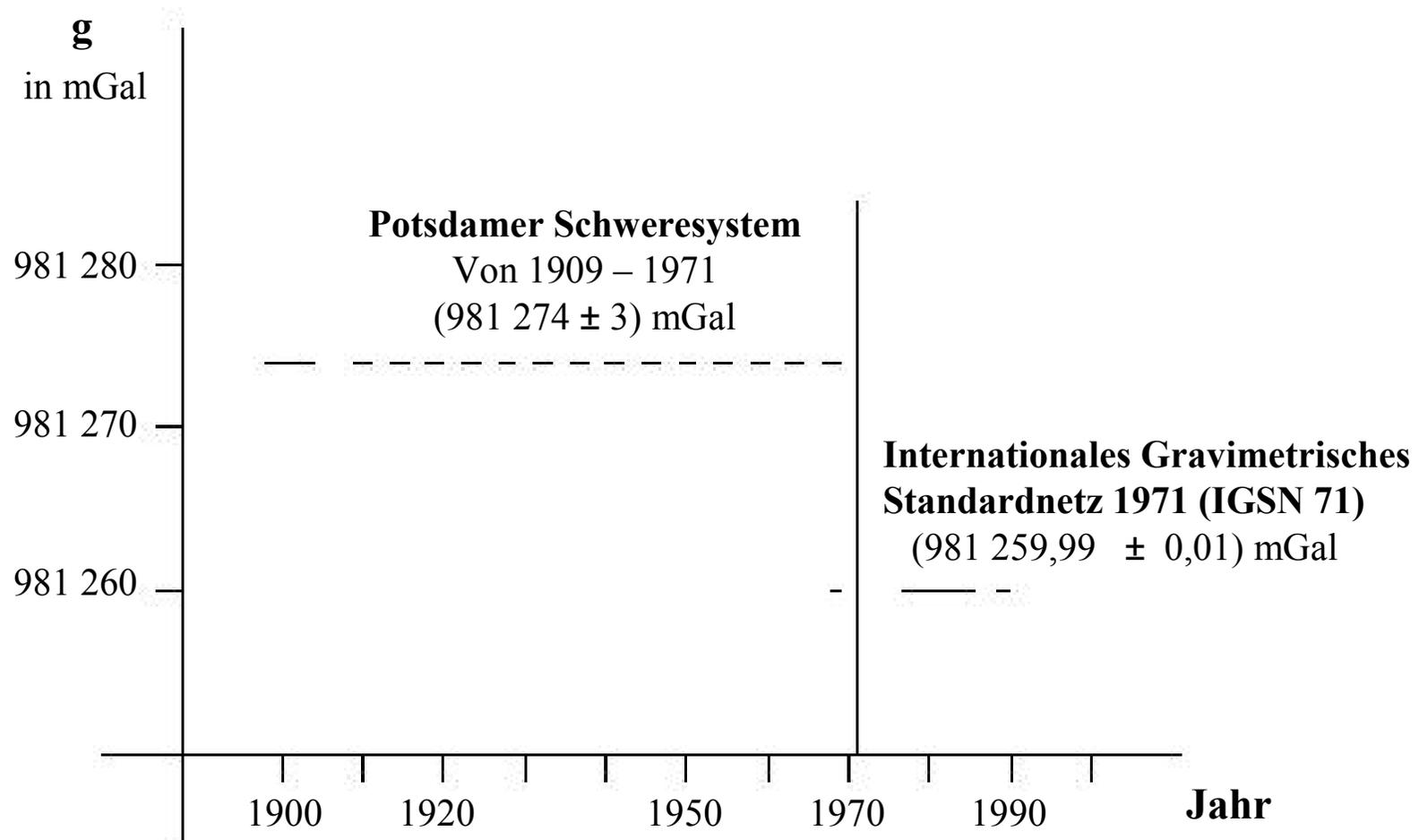


Tabelle 2. Weitere absolute Schweremessungen in Potsdam

Jahr	Institut / Bundesamt	Gerät	Ergebnis in μGal (1 $\mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$)
1994	Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG)	Absolutgravimeter FG5-101	981 261 404 \pm 5
2002	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	Absolutgravimeter FG5-101	981 260 393 \pm 3

Die Ergebnisse beziehen sich auf den Absolutpfeiler in einer Höhe von 1 m über der Vermarkung, beschriftet mit „Deutsches Schweregrundnetz“, im Pendelsaal. Für die Messungen wurden die gleichen Korrekturmodelle gewählt. Der hierbei verwendete vertikale Schweregradient beträgt 258,8 $\mu\text{Gal/m}$. Er war zwischen der Höhe 125 und ca. 25 cm über dem Pfeiler mit 4 Relativgravimetern bestimmt worden. Höchstwahrscheinlich ist die gemessene Schwereänderung von -11 μGal durch Massenänderungen in unmittelbarer Nähe des Meßpunktes verursacht worden. Ein Vergleich der Messungen mit den in Tabelle 1 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.

Literatur

Airy, G. B. On the Figure of the Earth. Encyclopaedia Metropolitana. Scientific Department, Cambridge 1830

Buschmann, E. Dr. rer. nat. Rudi Schüler 60 Jahre. Vermess.-Technik 33 (1985) 10, 351.

Byl, J. Zum 125. Geburtstag von Friedrich J. Kühnen. Vermess.-Technik 31 (1983) 6, 206-208.

Elstner, Cl., Fischer, H., Frey, R., Harnisch, G. und R. Schüler. Absolute Schweremessungen in Potsdam. Vermess.-Technik 18 (1970) 4, 128-131.

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) 182-186.

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

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, 245-253.

Helmert, F. R. Beiträge zur Theorie des Reversionspendels. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. und Centralbureau der Internat. Erdmessung. Potsdam 1898. 92 S.

Jordan / Eggert, Handbuch der Vermessungskunde 3. Bd., 2. Halbband, 329-338. Stuttgart 1941

Fortsetzung:

Literatur

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.

Lerbs, L., Sass, I. und Stange, A. Bibliographie der Mitarbeiter des Geodätischen Instituts 1861 - 1967. Arb. Geod. Inst. Potsdam (1968) 22

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

Meißner, O. Friedrich Kühnen. Nachruf. Ann. Hydrogr. und maritime Meteorol. 68 (1940), S. 69.

Schmehl, H. Ein Beitrag zum Zweipendelverfahren bei relativen Schweremessungen. Z. Geophys. 8 (1932) 427-438.

Schmehl, H. Das Potsdamer Schweresystem. Zum Gedenken an Friedrich J. Kühnen und Philipp F. P. Furtwängler. Forsch. und Fortschr. 16 (1940) 19/20, 220.

Schüler, R., Harnisch, G., Fischer, H. und R. Frey. Absolute Schwerebestimmungen mit Reversionspendeln 1968 – 1969. Veröff. ZIPE, Potsdam (1971) Nr. 10, 193 S.

Anhang: Numerische Angaben

Tabelle 1. Schwerewerte für ausgewählte Stationen in Deutschland

Station	Breite	Länge	Höhe in m	Schwere in m/s^2
Pol	90°		0	9,832 35
Flensburg	$54^\circ 47' \text{ N}$	$9^\circ 26' \text{ E}$	12	9,814 90
Potsdam	$52^\circ 23' \text{ N}$	$13^\circ 04' \text{ E}$	87	9,812 60
Wetzell	$49^\circ 09' \text{ N}$	$12^\circ 53' \text{ E}$	610	9,808 36
Garmisch	$47^\circ 30' \text{ N}$	$11^\circ 05' \text{ E}$	710	9,805 85
Zugspitze	$47^\circ 25' \text{ N}$	$10^\circ 59' \text{ E}$	2965	9,800 56
Äquator	0°		0	9,78049

Tabelle 2. Resultate der Pendelmessungen von 1821 bis 1823, ausgeführt im Auftrag der englischen Regierung an den Küsten des Atlantik von Sir Edward Sabine zur Bestimmung der Figur der Erde

Ort	Breite	Länge des Sekundenpendels in Zoll und in cm		Schwere in m/s ²
Spitzbergen	79° 43' 68" N	39,215	99,606	9,830 7
Grönland	74° 32' 19" N	39,203	99,575	9,827 7
Trondheim	63° 25' 54" N	39,174	99,502	9,820 4
London	51° 31' 08" N	39,139	99,413	9,811 7
New York	40° 42' 43" N	39,101	99,316	9,802 1
Jamaika	17° 56' 07" N	39,035	99,149	9,785 6
Trinidad	10° 38' 56" N	39,019	99,108	9,781 6
St. Thomas	0° 24' 41" N	39,021	99,113	9,782 1
Bahia	12° 59' 21" S	39,024	99,121	9,782 8