

# Das Bohnenbergersche Reversionspendel

Von Joachim Höpfner, Potsdam

Festkolloquium anlässlich der Wiederkehr des 250. Geburtstages von  
Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger  
am 10. Juli 2015 an der Universität Stuttgart

## Das Bohnenbergersche Reversionspendel

Von Joachim Höpfner, Potsdam

1. Einführung	3
2. Begriffe und physikalische Grundlagen	4
3. Erste Pendelmessungen zur genauen Bestimmung die Schwerkraft	7
4. <i>Bohnenbergers</i> Erfindung des Reversionspendels	10
5. <i>Katersches</i> Reversionspendel	13
6. <i>Bohnenbergersches</i> Reversionspendel	14
7. Anwendungen des Reversionspendels für Absolutschweremessungen	16
7. 1. Absolute Schwerebestimmungen mittels Reversionspendelapparat von <i>Repsold</i>	16
7. 2. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam 1898-1904 durch <i>Kühnen</i> und <i>Furtwängler</i>	18
7. 3. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam 1968-1969 durch <i>Schüler, Harnisch, Fischer und Frey</i>	23
7. 3. 1. 25-cm-Reversionspendelgerät	23
7. 3. 2. Quarzpendelgerät	26
8. Schlußbetrachtungen	30
9. Fazit	34
Literatur (Auswahl)	35

## 1. Einführung

Nachdem **Galilei** die **Fallgesetze und die Pendelgesetze** um **1590** entdeckt hatte, richteten sich viele Untersuchungen darauf, die **Schwerkraft zu bestimmen**. **Fallversuche** führten jedoch zu keinen genauen Resultaten, da zu dieser Zeit die technischen Möglichkeiten dafür noch fehlten, insbesondere die Kurzzeitmessung betreffend. Mit **Pendelbeobachtungen** konnten weitaus größere Genauigkeiten für Schwerebestimmungen dadurch erreicht werden, daß die Schwingungsdauer eines Pendels aus Messungen der Schwingungszeiten für eine große Anzahl von Schwingungen abgeleitet werden kann.

Die **ersten Pendelmessungen wurden mit Fadenpendeln** zur Bestimmung der Schwerkraft ausgeführt. Beobachtet man die Schwingungszeiten mit ein und demselben Pendel an verschiedenen Orten, so ist ein invariables Pendel oder zumindest ein solches Pendel, dessen Veränderungen man berechnen kann, erforderlich, um genaue vergleichbare Resultate für die Schwerkraft ableiten zu können.

Um die Pendellänge genau zu bestimmen, wurden *theoretische Betrachtungen und Rechnungen* angestellt und *Versuche mit zusammengesetzten physischen Pendeln* ausgeführt. **Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger** (1765-1831, deutscher Astronom, Mathematiker, Physiker und Geodät) hatte die Idee, daß man ein **zusammengesetztes Pendel mit zwei Schneiden** so bauen kann, daß es *in beiden Schneidenlagen mit gleicher Schwingungsdauer schwingt*. Das war seine *Erfindung des Reversionspendels*.

## 2. Begriffe und physikalische Grundlagen

### **Das Pendel**

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

### **Mathematisches Pendel**

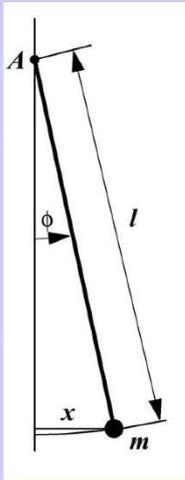
Es ist eine *Idealisierung*, bei der man sich die gesamte schwingende Masse ***m*** in einem Punkt vereinigt denkt, der am Ende eines masselosen, unausdehnbaren Fadens befestigt ist (*Fadenpendel*).

### **Pendelgesetze**

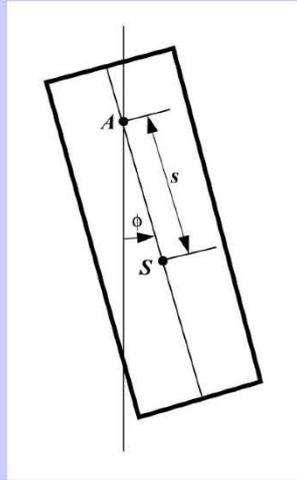
1. Die **Schwingungsdauer *T*** ist unabhängig von der **Masse *m*** des Pendelkörpers.
2. Für kleine Schwingungen ist sie unabhängig von der größten Auslenkung aus der Ruhelage, der **Schwingungsweite** oder Amplitude.
3. Die **Schwingungsdauer  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$** , wobei ***l*** die **Pendellänge** und ***g*** die **Erdbeschleunigung** sind.

### **Physikalisches Pendel**

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



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



$$T = 2 \pi \sqrt{s/g}$$

### Mathematisches Pendel (links)

*A* - Achse, Drehpunkt  
*m* - Masse des Fadenpendels  
*l* - Pendellänge

### Physikalisches Pendel (rechts)

*A* - horizontale Drehachse  
*S* - Schwingungsmittelpunkt  
*s* - reduzierte Pendellänge

$\Phi$  - Auslenkwinkel, Schwingungsweite  
*T* - Schwingungsdauer

Bei kleiner Schwingungsweite  $\Phi$  kann die Bewegung des Pendels als *harmonische Schwingung* betrachtet werden.

### Das Sekundenpendel ( $T = 2$ s)

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 Halbsekundenpendel ( $T = 1$ s)

Die *halbe Schwingung* eines Halbsekundenpendels dauert eine *halbe Sekunde*. Mit der Schwingungsdauer  $T = 1$  s ist seine **Pendellänge *l*** **rd. 24,9 cm**.

### Das Reversionspendel

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

### Formel zur Berechnung der Erdbeschleunigung (Schwere)

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

### Verwendete Maßeinheiten für die Schwere

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

### 3. Erste Pendelmessungen zur genauen Bestimmung die Schwerkraft

Nachdem die *Pendelgesetze* von *Galileo Galilei* entdeckt und 1629 formuliert worden waren, bemühten sich Astronomen und andere Wissenschaftler darum, *Pendelmessungen zur genauen Bestimmung die Schwerkraft  $g$*  zu nutzen.

Bei den **ersten Versuchen** waren die verwendeten *Apparate und Meßmethoden sehr einfach*. Die **Fadenpendel** hatten *Pendelkörper* in Form von einer *Blei- oder Kupferkugel* von etwa 1 Zoll (25 mm) Durchmesser. An einer Mauer wurde eine *Metallzange* befestigt. Sie diente dazu, das obere Ende des Fadens festzuhalten. Als *Pendellänge* galt der *Abstand zwischen der Unterfläche der Zange und der Kugelmitte*.

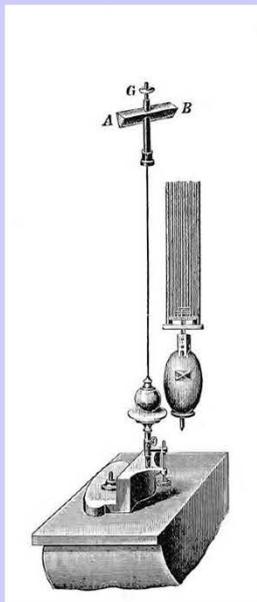
1792 fanden die Pendelmessungen von *Jean-Charles de Borda* (1733-1799, französischer Physiker und Mathematiker) und *Jean-Dominique Cassini* (IV, 1748-1845, französischer Physiker) am **Pariser Observatorium** statt.

Alle bis Ende des 18. Jahrhunderts erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der Pendelmessungen haben *J.-Ch. de Borda* und *J.-D. Cassini* in ihren Arbeiten verwertet. Deshalb sind es die *ersten exakten Bestimmungen der Länge des Sekundenpendels*.

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

7

### Fadenpendel von *Borda* und *Cassini*



*AB* - Schwingungsachse des 2-s-Fadenpendels  
(hier: *T* - Halbschwingungsdauer)

*G* - verschiebbares Gewicht zur Regulierung der Schwingungsdauer

Der *Pendelkörper* ist eine *Platinkugel* von 36,5 mm Durchmesser und 526 g Masse. Dieser ist an einem dünnen *Eisendraht* von 12 Fuß (3,97 m) Länge aufgehängt.

*Rechts* neben dem Fadenpendel ist die mit einem weißen, liegenden Kreuz *markierte Pendellinse der Pendeluhr* dargestellt.

Eine *Hilfsvorrichtung unter dem Pendel* diente zur *Messung der Pendellänge*: Stativ mit höhenverstellbarem Tischchen auf einer Konsole

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

8

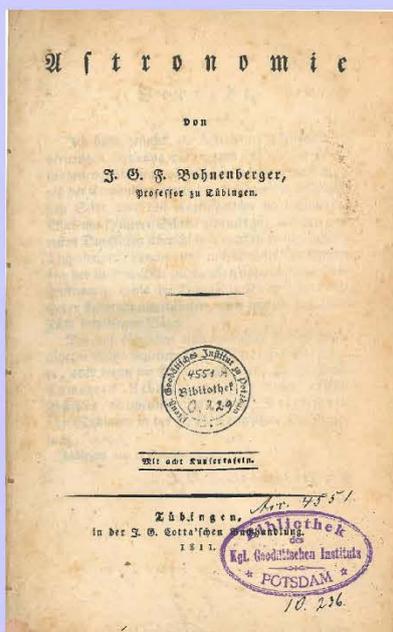
## Historische Fadenpendelmessungen

Wissenschaftler	Jahr	Land	Pendellänge	Masse
Galileo Galilei	1629	Italien	<i>entdeckte Fall- und Pendelgesetze</i>	
Mersenne	1644	Frankreich	<i>(Hinweis auf Zeitmessung)</i>	
Riccioli	1647	Italien		
Picard	1669	Frankreich	<i>(Gradmessung Paris-Amiens)</i>	
Richer	1672	Frankreich	<i>g ist ortsabhängig!</i>	
Bouguer & La Condamine	1735	Frankreich	<i>(Gradmessung in Peru)</i>	
Borda & Cassini	1792	Frankreich	3,97 m (2-s-Pendel)	526 g
Bessel	1826/1827	Deutschland	Diff. von 1 Toise	625 g
Foucault	1851	Frankreich	62 m (Foucault-Pendel)	28 kg

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

9

## 4. Bohnenbergers Erfindung des Reversionspendels



Wie *Bohnenberger* in seinem 1826 publizierten Aufsatz erwähnt, fällt seine **Idee zur Erfindung** in die Jahre 1793/1794 während seines Studienaufenthaltes in Göttingen. Erst 1811 erschien sein 510seitiges *Lehrbuch Astronomie* mit einer **Darstellung dieser Erfindung**.

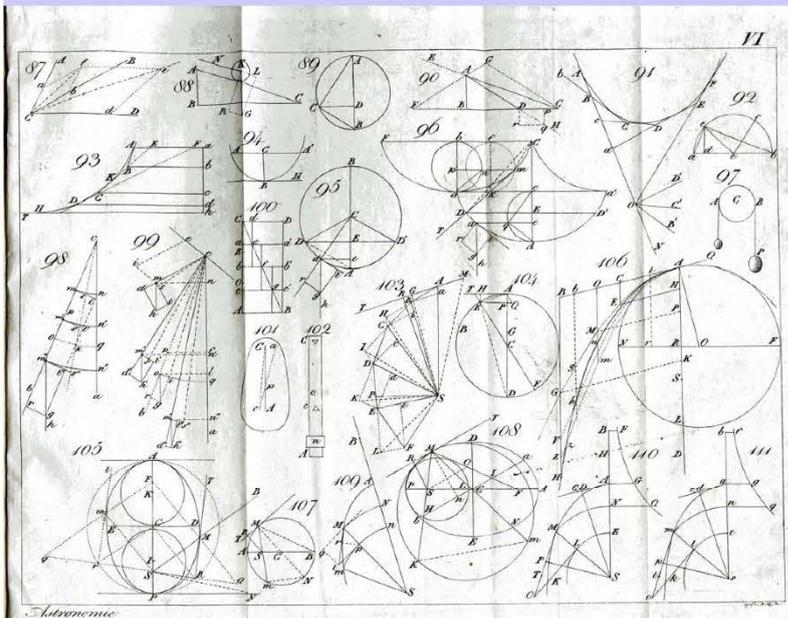
### Inhaltsverzeichnis:

- *Erstes Buch*. Von den scheinbaren Bewegungen der Himmelskörper (Sphärische Astronomie).
- *Zweites Buch*. Von den wahren Bewegungen der Himmelskörper (Theoretische Astronomie).
- *Drittes Buch*. Von den Gesetzen der Bewegung, und ihrer Anwendung auf die Bewegung der Himmelskörper (Physische Astronomie)

II. Kap. des dritten Buchs zum Thema *Von den Wirkungen der Schwere*, §§ 253 bis 270 (S. 417-457) mit den Figuren 88 bis 102 (Anhang, Tafel VI).

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

10

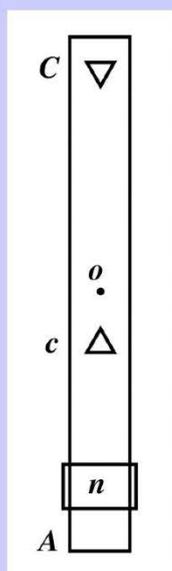


## Figuren zu den Körper- und Pendelbewegungen

(Anhang, Tafel VI aus dem Astronomie-Lehrbuch)

Figur 102 zeigt den Entwurf eines einfachen Reversionspendels von Bohnenberger

## Bohnenbergers Entwurf des Reversionspendels



Um die *Länge des einfachen Pendels* zu bestimmen, hat *Bohnenberger* den im Bild gezeigten *Entwurf eines Reversionspendels* gemacht und, wie folgt, beschrieben:

*CA* - *zylindrische oder prismatische Stange*, die *keilförmige Zapfen* bei *C* und *c* aufweist

*o* - *Mittelpunkt des Schwungs*

*n* - *zwischen cA verschiebbare kleine Masse*.

Die *Zapfen* haben *gegen einander gerichtete Schneiden*. Sie sind auf der Stange senkrecht und parallel zueinander angebracht.

Der *Abstand Cc* beträgt etwas über *2/3 der Stangenlänge*, so daß der *Mittelpunkt des Schwungs o* zwischen *C* und *c* fällt.

Der *Schwerpunkt* des Pendels muß in die Ebene der *Schwingungsachsen* fallen.

Mit der *verschiebbaren Masse n* wird erreicht, daß beim Schwingen um *C* der *Mittelpunkt der Schwingung* in die *Schneide c* fällt. Sind die *Schwingungen um C und c* von *gleicher Dauer*, so sind sie *isochronisch*. Alsdann ist der *Abstand der Schneiden Cc* des *Reversionspendels* gleich der *Länge des einfachen Pendels*.

## 5. Katersches Reversionspendel



**Henry Kater** (1777-1835, englischer Wissenschaftler) hat das Verdienst als erster das Reversionspendel gebaut und zu Messungen eingesetzt zu haben.

Der Hauptteil des **Katerschen Reversionspendels** ist ein etwa **135 cm langer Messingstab mit rechteckigem Querschnitt** von rd. **4 cm x 3 mm**, der zwei **rechteckige Ausschnitte im Abstand von etwa 1 m** aufweist. An den beiden Stabenden sind **Messinglaschen** aufgeschraubt. Gegen die durch die Laschen gebildeten Winkel wurden die etwa **4,5 cm langen Stahlprismen mit den Schneiden** angeschraubt.

An dem Pendel sind **3 Massen** befestigt:

- eine **zylindrische Messingmasse** von etwa 950 g an einem Ende
- eine **Masse** von 230 g zwischen den Schneiden und
- eine mittels Feinbewegung **verschiebbare Masse** von 125 g ungefähr in der Mitte des Messingstabes.

Ferner sind

- **43 cm lange Holzstäbe** mit einer Spitze als **Zeiger** an jedem Ende.

**Kater** baute sein Reversionpendel und benutzte es dazu, die Länge des Sekundenpendels in der Breite von **London** zu bestimmen. **1818** erschien sein Aufsatz über die ausgeführten Arbeiten.

## 6. Bohnenbergersches Reversionspendel

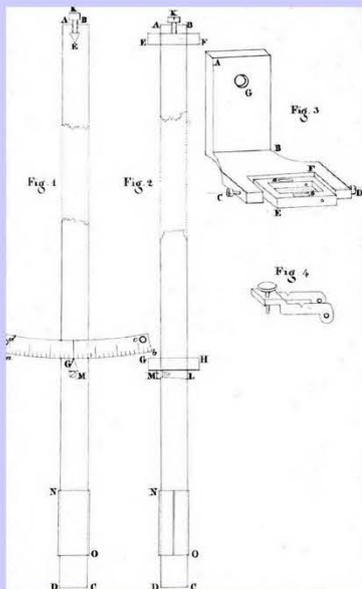


Fig. 1 und 2: **Reversionspendel**

**ABCD** - **zylindrische Messingstange** von **150 cm Länge** mit 2 Öffnungen für die **Stahlschneiden**

**EF** - **obere Schneide** mit Befestigungsschraube **K**

**GH** - **untere Schneide** mit keilförmigem Messingstück **L** und Sicherungsschraube **M**

**NO** - **manschettenartiges Laufgewicht** von 19,6 g

**abcd** - **Skala** zur Messung der Pendelamplitude  
Gesamtmasse des Messingpendels: ca. 2,6 kg

Fig. 3: **Vorrichtung zum Aufhängen des Pendels**

**ABCD** - **Messingträger** mit gabelförmigem Arm  
**BCD**

**EF** - **Messingrahmen**

**a, b** - **Agatblättchen** als Schneidenauflagen

Fig. 4: **Vorrichtung zum Einhängen des Pendels**



**Reversionspendel,**  
 angefertigt nach dem Entwurf von  
**J. G. F. Bohnenberger** durch den  
 Feinmechaniker **G. Oesterle** der  
**FHT Stuttgart**

**Bohnenberger (1826)** stellte *Rechnungen* an, wie das beschriebene Reversionspendel *ohne Laufgewicht* in beiden Lagen schwingt. Dann berechnete er den Abstand des Laufgewichts von der ersten Schneide und dann in der umgekehrten Lage des Pendels. Letztlich war der *Abstand des Laufgewichts* auf 131,02 cm einzustellen, was Versuchsmessungen bestätigten.

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
 Reversionspendel

15

## 7. Anwendungen des Reversionspendels für Absolutschweremessungen

### 7.1. 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:  $\pm 7 \text{ mGal}$*

**1870** **Koinzidenzmethode**  
*Genauigkeit der Schwerebestimmung:  $\pm 3 \text{ mGal}$*

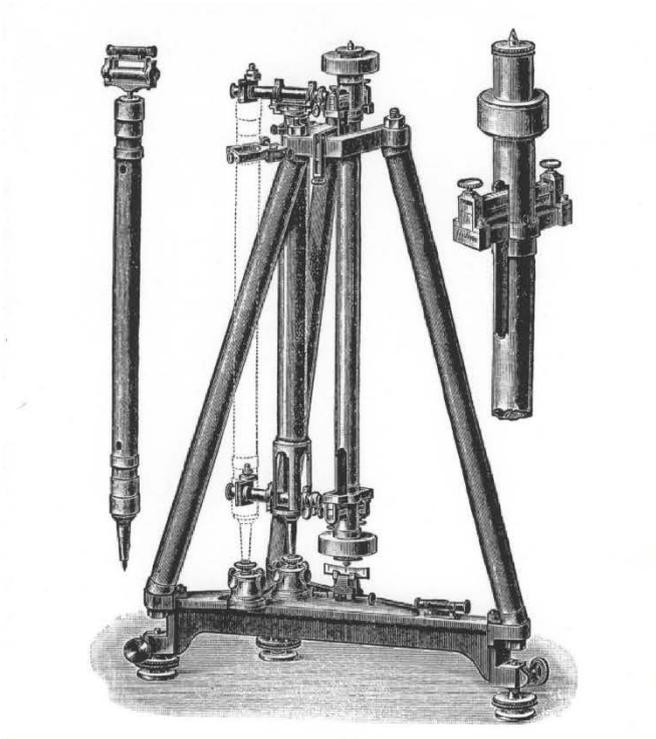
**Bestimmung der Pendellänge** vor und nach den Schwingungsbeobachtungen für jede Kombination unter Berücksichtigung des *Schneidenbeleuchtungseffektes*, Arbeit **mit aufrechtem und umgekehrtem Maßstab**

**Ableitung des Uhrganges** für Stationsuhr durch *astronomische Zeitbestimmungen*

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

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
 Reversionspendel

16



### 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

#### Angaben zum Pendel

Länge: **125 cm**  
 Masse: 7,5 kg  
 Material: Messing  
 Schneiden: Stahl, Achat

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
 Reversionspendel

17

## 7.2. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam 1898-1904 durch Kühnen und Furtwängler

**1898-1904** Bestimmung des Absolutwertes der Schwere mit Reversionspendeln im Pendelsaal des Geodätischen Instituts Potsdam

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)

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

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
 Reversionspendel

18

**Die Koinzidenzbeobachtungen** erfolgten nach folgendem Schema:

- für *schweres Gewicht unten* **zweimal 16 Koinzidenzen**, nämlich - bei großer Amplitude (etwa 26' bis 15') und dann - bei kleiner Amplitude (etwa 9' bis 6') und
- für *schweres Gewicht oben* (die Amplitude nahm doppelt so schnell ab) **zweimal 8 Koinzidenzen**, wieder - bei großer Amplitude und dann - bei kleiner Amplitude.

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

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

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

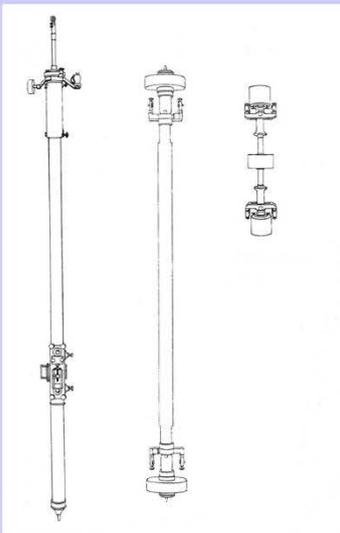
Nach Reduktion der Beobachtungen wurde eine **Ausgleichung nach einem Ansatz von Helmer** ausgeführt. **Das Endergebnis lautet:**

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.

### Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam 1898-1904 durch Kühnen und Furtwängler



**Fadenpendel, Sekundenpendel und Halbsekundenpendel**  
(schematisch, von links nach rechts) für den historischen  
Potsdamer Reversionspendelapparat

- Das **Fadenpendel** schwingt in einer Messingröhre.
- **Sekundenpendel** sind Messingrohre. An den Enden sind das schwere, volle und das leichte, hohle Gewicht aufgesetzt.
- Das **Halbsekundenpendel** hat eine volle Pendelstange, außerdem ist in dessen Mitte ein Gewicht angesetzt.



### **Pendelapparat**

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

Vorn, links:

**Komparator für Längenmessungen**

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

21



### **Koinzidenzapparat nach *Sterneck***

Zur Bestimmung der Schwingungsdauer  
aus *Koinzidenzintervallen* wurden die  
*Koinzidenzmomente* vom *Pendel* mit dem  
*Uhrpendel* nach der elektrischen Methode  
von *Sterneck* beobachtet.

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

22

### 7.3. Bestimmung der absoluten Schwere in Potsdam 1968-1969 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:

- 1) **25-cm-Reversionspendelgerät** und
  - 2) **Quarzpendelgerät** mit *drei Pendelpaaren verschiedener Länge, aber gleicher Masse*
- Bei beiden Geräten wurde das **Zweipendelverfahren** angewandt.

#### 7.3.1. 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

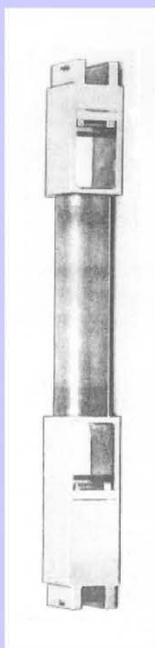
**Doppel-T-Förmiges Stativ** mit vier Lagerflächen, die den Pendelschneiden zugeordnet sind

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

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

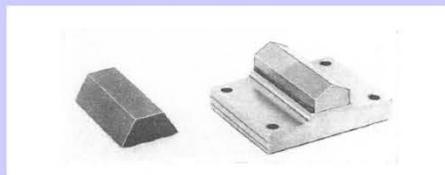
J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

23



Messingpendel (links) für das  
25-cm-Reversionspendelgerät (rechts)

Lagerfläche (links) und Schneide mit  
Grundkörper (rechts)



J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

24

### Schwingzeitmessungen

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

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  $4^\circ$  vom  
Sollwert  $180^\circ$  ab.

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

**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

### Reduktionen

**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

## 7.3.2. Quarzpendelgerät

**Messungen mit drei Reversionspendelpaaren verschiedener Länge, aber gleicher Masse**

Die *reduzierten Pendellängen* betragen  $37,5 \text{ cm}$ ,  $50 \text{ cm}$  und  $75 \text{ cm}$ . Masse der Pendel: **3,3 kg**

### Material und Form der Pendel:

- **optisches Quarzglas** bis auf kleine Abstimmerschrauben
- **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

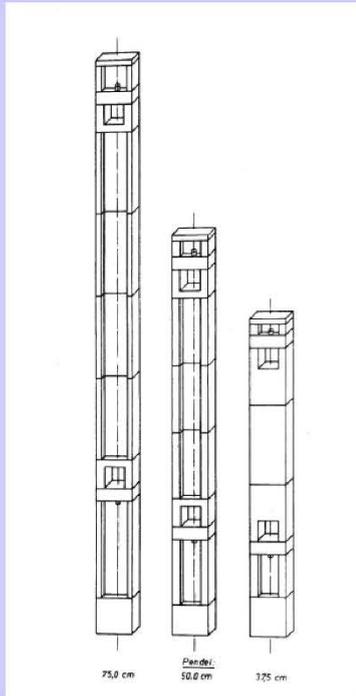
Der **Pendelapparat** ruht auf einem *massiven Doppelpfeiler aus Granit* (keine Mitschwingeffekte  
sind zu berücksichtigen). Zu beiden Seiten des Pendelapparates: **Autokollimationseinrichtung**  
zur *Justierung der Pendel* und zur Bestimmung der *Pendelamplitude (etwa  $20'$ )*.

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 in *evakuiertem Pendelapparat*  
bei  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$  Torr, die mit einer Phasendifferenz von  $180^\circ$  schwingen.



### Quarzpendel

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

Die Pendel haben **Schwingflächen**. Sie mußten aus kürzeren Stücken zusammengesetzt werden.

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

27



### Quarzpendelgerät

auf dem Pfeiler S12 im NO-Keller  
des Hauptgebäudes

Aufnahme: L. Hannemann

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

28

### 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 Quarzendaßmaßen entsprechender Länge verglichen** werden (Ansprengen von Planspiegeln nötig)

Erreichte Vergleichsgenauigkeit: 0,01 bis 0,02  $\mu\text{m}$

## 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.

## 8. Schlußbetrachtungen

**Die Erfindung des Reversionspendels von J. G. F. Bohnenberger**, die er 1811 publiziert hatte, war deshalb so bedeutsam, weil mit dem Reversionspendel eine *neue genauere Methode für absolute Schwerkraftbestimmungen* zum Einsatz kommen konnte.

Zuerst wurden auf **Feldstationen** solche Messungen mit dem *Repsoldschen Reversionspendelapparat* auch ausgeführt. Sie wurden aber wegen der Schwierigkeiten beim Transport des großen Pendelapparates und anderer Probleme wieder eingestellt.

Gemäß den gegebenen **Empfehlungen einer Pendelkommission der Europäischen Gradmessung** sollten nur noch **an wenigen Stationen absolute Schweremessungen mit den Reversionspendeln** und **auf Feldstationen relative Schweremessungen mit invarablen Pendeln** erfolgen.

Ab 1892 wurden am *Geodätischen Institut Potsdam relative Schweremessungen* mit einem **Einpendelapparat** mit **zwei Sterneck-Pendeln** als Versuchs- und Anschlußmessungen durchgeführt. 1908 folgten Messungen mit einem neukonstruierten **Drei- bzw. Vierpendelapparat**.

## Pendel der Potsdamer Reversionspendelgeräte



Historisches *Halbsekundenpendel* von 1898-1904, ein *Messingpendel* für das 25-cm-Reversionspendelgerät und ein *37,5-cm-Quarz-Pendel* für das Quarzpendelgerät von 1968-1969 (von links nach rechts)

## Invariable Pendel nach *Sterneck* für relative Schweremessungen



*Halbsekundenpendel* (links)  
Material: *Messing, Invar, Bronze*  
und *Quarz*  
Masse der Linsen: 1 kg

## *Historische Reversionspendelmessungen*

Wissenschaftler	Jahr	Station	Pendellänge	Masse und Material
Bohnenberger	1811	Tübingen	<i>Erfindung des Reversionspendels</i>	
Kater	1817	London	145 cm	1410 g, Messing
Bohnenberger	1826	Tübingen	150 cm	2,6 kg, Messing
Bessel / Repsold	1862-1890	<i>Feldeinsatz</i>	125 cm	7,5 kg, Messing
Oppolzer	1884	Wien	1 m	leichtes + schweres P.
Kühen & Furtwängler	1898-1904	Potsdam	1 m, 0,25 m	2,9 ... 6,2 kg, 3,5 kg Messing
Heyl & Cook	1934/1935	Washington	1 m	1,9 ... 3,6 kg, Quarz
Clark	1936-1938	Teddington	100 cm	23 kg, Y-Leg, + Delta-Metall
Agaleckij & Egorov	1954-1959	Leningrad	40, 60, 75 cm	4,6 kg, Quarz
Baglietto	1958-1961	Buenos Aires	<i>s. Heyl &amp; Cook</i>	
Schüler, Harnisch u. a.	1968-1969	Potsdam	1) 25 cm 2) 37,5, 50, 75 cm	4 kg, Messing 3,3 kg, Quarz

**Historische Reversionspendelmessungen** wurden für absolute Schwerebestimmungen über einen **Zeitraum von 160 Jahren** ausgeführt.

*Die Ungenauigkeiten der Potsdamer Schwerebestimmungen mit Reversionspendeln sind:*  
 $\pm 7 \text{ mGal}$ ;                     $\pm 3 \text{ mGal}$ ;                     $\pm 0,8 \text{ mGal}$ ;                     $\pm 0,3 \text{ mGal}$ .

Mit der 2. *Absolutschwerebestimmung* mit Reversionspendeln in Potsdam 1968-1969 war die Zeit für eine weitere Anwendung des Reversionspendelverfahren endgültig vorbei. Wie so oft, begann aber der **Übergang in eine neue Epoche der absoluten Schweremessungen** schon **ab 1951** durch die *Experimente von Ch. Volet mit fallendem Maßstab*.

Der **technische Fortschritt** auf den Gebieten der *interferometrischen Längenmessung und der Kurzzeitmeßtechnik* erlaubten es, die **Fall- und Wurfmethoden** für diesen Zweck zu entwickeln. Dabei zeigte sich, daß sie dem Reversionspendelverfahren hinsichtlich des Einflusses systematischer Fehler **eindeutig überlegen** sind.

*Neue Geräte für absolute Schweremessungen sind transportable Absolutgravimeter*. Sie erreichen Genauigkeiten in der Größenordnung von *wenigen Mikrogal ( $\mu\text{Gal}$ )*.

---

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

## 9. Fazit

**Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger** (1765-1831) hat als Astronom, Mathematiker, Physiker und Geodät herausragende wissenschaftliche Leistungen erbracht und sich damit große bleibende Verdienste erworben.

Seine **Erfindung des Reversionspendels** publizierte er in seinem Lehrbuch *Astronomie* im Jahre 1811. Sie war deshalb so bedeutsam, weil eine **Anwendung des Reversionspendels für Messungen der absolute Schwere eine hohe Steigerung der Genauigkeit** bedeutete.

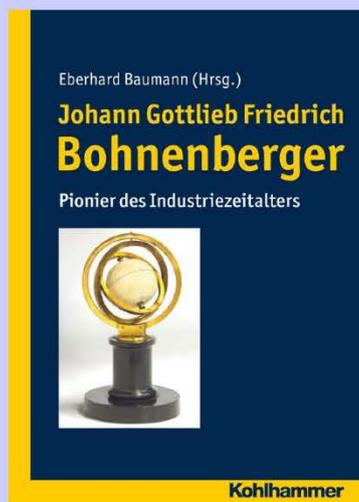
## Literatur (Auswahl)

- Bohnenberger, J. G. F.** Astronomie. Mit 8 Kupfertafeln. Tübingen 1811. 510 p.  
Von den Wirkungen der Schwere, §§ 253-270, S. 417-457.
- Bohnenberger, J. G. F.** Über die Bestimmung der Länge des einfachen Sekundenpendels. Naturwissenschaftl. Abhandl. Tübingen. 1826. S. 1-34. (Fig. 1-3)
- Helmert, F. R.** Beiträge zur Theorie des Reversionspendels. Veröff. Kgl. Preuß. G. I. und Centralbureau der Internat. Erdmessung. Potsdam 1898. 92 S.
- Höpfner, J.** Absolute Bestimmung der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam. Dt. Gesellschaft für Chronometrie, Jahresschrift 2012, Bd. 51, S. 101-114.
- Jordan, W., Eggert, O.** Handbuch der Vermessungskunde. 3. Bd. 2. Halbband. 8. erw. Aufl. Stuttgart 1941 S. 329- 338.
- Kater, H.** An Account of Experiments for Determining the Length of the Pendulum Vibrating Seconds in the Latitude of London. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 108 (1818), pp. 33-102.
- Kater, H.** Auszug aus einem Schreiben des Herrn *Capitains Henry Kater* an den Herausgeber vom 7. Junius 1825. Anmerkung von *Schumacher, H. C.* Astron. Nachr. 4. Band, Nr. 85, 225-226.
- Kühnen, F. & 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.
- Recknagel, A.** Physik , Mechanik. Verlag Technik Berlin 1955.
- Schüler, R., Harnisch, G., Fischer, H. & R. Frey.** Absolute Schwerebestimmungen mit Reversionspendeln 1968 – 1969. Veröff. ZIPE, Potsdam (1971) Nr. 10, 193 S.

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

35

## Hinweis auf ein Buch



Bibliographische Angaben  
Neuerscheinung: 1. Auflage, 2015  
ISBN/ Artikel-Nr.: 978-3-17028960-4

Das Buch zur Geschichte der Naturwissenschaft und Technik hat 321 Seiten und umfasst in den Beiträgen der verschiedenen Autoren das Leben Bohnenbergers, seine wissenschaftlichen Arbeiten, Leistungen und Entdeckungen auf den Gebieten Astronomie, Mathematik, Physik und Geodäsie. Speziell finden sich auf den Seiten 115 bis 152 im Aufsatz

*Höpfner, J. Das Reversionspendel – Johann Gottlieb Friedrich Bohnenbergers Erfindung zur Messung der Schwerkraft*

die oben in den einzelnen Kapiteln gegebenen Inhalte ausführlicher behandelt. Darüber hinaus ist ein geschichtlicher Überblick über Pendelbewegungen und Pendelmessungen von 1585 bis 1887 enthalten.

J. Höpfner: Das Bohnenbergersche  
Reversionspendel

36