

Werk

Jahr: 1930

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:6

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0006

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0006

LOG Id: LOG_0005

LOG Titel: Ein neuer Vierpendelapparat für relative Schweremessungen

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Ein neuer Vierpendelapparat für relative Schweremessungen *)

(Jenaer Geophysikalische Forschungsarbeiten, unterstützt von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft)

Von **O. Meisser** — (Mit 14 Abbildungen)

Es wird ein neuer Vierpendelapparat mit prinzipiellen Verbesserungen beschrieben. Um ein Instrument zu schaffen, das den praktischen Forderungen nach erhöhter Beobachtungsgenauigkeit und Geländebrauchbarkeit genügen dürfte, wurden beim Bau die Fortschritte in der Theorie des Pendels, die Ergebnisse der Werkstoffforschung und die jeweiligen Anwendungsmöglichkeiten physikalischer Meßmethoden eingehend berücksichtigt.

In einer kürzlichen Arbeit**) habe ich für relative Schweremessungen mit Pendeln ein Beobachtungsverfahren und die entsprechenden Hilfsmittel angegeben, die gestatten, die Schwingungsdauerdifferenzen mehrerer Pendel gleichzeitig an verschiedenen Beobachtungspunkten mittels der einzelnen Signale einer drahtlosen Uhr zu bestimmen. Die Genauigkeit der Schwingungsdauerdifferenzen beträgt schon bei einer Beobachtungszeit von etwa 40 Minuten einige Einheiten in 10^{-8} sec für Halbskundenpendel. Der Uhgang der drahtlosen Sekundenmarken braucht hierbei selbst bei Schweredifferenzen von etwa 100 mg nur auf Minuten (in 24^h) bekannt zu sein. Die bisherige Grenze der Genauigkeitssteigerung von Pendelmessungen, die durch die der astronomischen Zeitbestimmung gegeben ist, wird somit durch den Übergang zu einem relativen Zeitmeßverfahren mittels drahtloser Einzelzeichen einer Uhr und durch die Ausbildung eines entsprechenden Registriergeräts beseitigt. Will man jedoch diese neue experimentelle Genauigkeitssteigerung bei den Messungen für geophysikalische Aufschlußuntersuchungen oder bei allgemeinen Schweremessungen zur Abkürzung der bisherigen relativ langen Beobachtungszeit voll ausnutzen, so werden auch erhöhte Anforderungen an die Leistungen des Pendelapparats selbst gestellt, um die übrigen Fehlerquellen in gleichem Maße entsprechend klein zu halten. Im folgenden soll eine kurze Beschreibung von dem neuen **Jenaer Vierpendelapparat** gegeben werden, der mit dem Ziele entwickelt wurde, den obigen For-

*) „Vortrag, gehalten auf der Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Dresden 1929.“

**) O. Meisser und H. Martin: Erhöhung der Beobachtungsgenauigkeit bei relativen Pendelmessungen. I. Registrierung von Pendelschwingungen. Zeitschr. f. Geophys. 5, 145 (1929).

derungen auf eine erhöhte Meßgenauigkeit entsprechend dem Beobachtungsverfahren Rechnung zu tragen.

Jede Verbesserung des Pendelapparats muß auch eine Erhöhung der Invariabilität der Pendel mit sich bringen. Die von Sterneck angegebene Form der Pendel (s. Fig. 7, A) — eine relativ dünne Stange mit einem schweren Gewicht am Ende — ist, von geringen Änderungen abgesehen, bis jetzt stets beibehalten worden. Kleine Verschiebungen dl der Schneidenfläche bedingen recht beträchtliche Fehler dT in der Halb-Schwingungsdauer T — es ist

$$dT = \frac{dl}{2l} \cdot T \dots \dots \dots (1)$$

wobei l die entsprechende reduzierte Pendellänge bezeichnet —, wie die bestehende Tabelle 1 für ein Halbsekundenpendel zeigt:

Tabelle 1.

$dT \cdot 10^7 \text{ sec}$	0.25	1.0	2.5	5.0
$dl \cdot 10^3 \text{ mm } (\mu)$	0.03	0.1	0.25	0.50
$\mathcal{L}g \cdot 10^3 \text{ cm sec}^{-2}$	0.1	0.4	1.0	2.0

Trotz der verschiedenen Hilfsmittel, das Sterneckpendel stets an dieselbe Stelle des Lagers zu bringen, ist es wohl aussichtslos, auf die Dauer eine Reproduzierbarkeit von einigen Einheiten in 10^{-8} sec für die Schwingungsdauer sicher erreichen zu wollen.

Die reduzierte Pendellänge eines physischen Pendels l ist bekanntlich (s. Fig. 1)

$$l = \frac{K_0 + s^2 \cdot M}{M \cdot s} \dots \dots \dots (2)$$

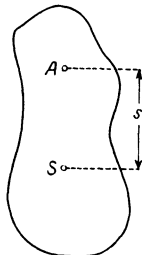


Fig. 1

wenn K_0 das auf den Schwerpunkt S bezogene Trägheitsmoment des Pendelkörpers und s den Abstand der Drehachse A von S bezeichnet; M ist die gesamte Pendelmasse. Da nun bei relativen Schweremessungen die Größe l , d. h. indirekt SA , konstant bleiben muß, um die nötige Invariabilität zu erreichen, fragt es sich, ob man SA nicht so wählen kann, daß eine geringe Veränderung von s eine möglichst kleine Änderung in der Schwingungsdauer T bzw. der reduzierten Pendellänge l hervorruft. Die mathematische Bedingung lautet dafür $dl/ds = 0$ oder geometrisch-physikalisch gesprochen: die Pendellänge l bzw. die Schwingungsdauer muß für den entsprechenden Schneidenabstand vom Schwerpunkt des Pendelkörpers ein Extremum, hier Minimum, werden. Auf diese Konstruktionsmöglichkeit hat zuerst Wilsing*) und neuerdings allgemein für Pendel Schuler**)

*) J. Wilsing: Über eine besondere Form invariabler Pendel. Zeitschr. f. Instrkde. 17, 109 (1897).

**) M. Schuler: Ein neues Pendel mit unveränderlicher Schwingungszeit. Zeitschr. f. Phys. 42, 547.

und für Schwerependel im Anschluß daran Kohlschütter*) hingewiesen. Die Fig. 2 zeigt die Schwingungsdauer T_s in Abhängigkeit von dem Schwerpunktsabstand s der Schneide; als Abszisse wurde die Größe s/s_0 und als Ordinate T_s/T_{Min} gewählt, um der Kurve einen allgemeineren Charakter zu geben. Es ist

$$s_0 = \sqrt{\frac{K_0}{M}} \quad \text{und} \quad T_{\text{Min}} = \pi \sqrt{\frac{2s_0}{g}} \dots \dots \dots (3)$$

Die Größe s_0 bezeichnet man in der Mechanik als Trägheitsradius. Bei einer vorgegebenen Massenkonfiguration (Massenelement m_i , Massenschwerpunkt S_i , Abstand Achse A —Massenschwerpunkt $S_i = e_i$ siehe Fig. 3) wird das Pendel die kleinste Schwingungsdauer aufweisen, wenn die Schneide A im Abstand des Trägheitsradius s_0 befestigt wird, die reduzierte Pendellänge l hat dann den

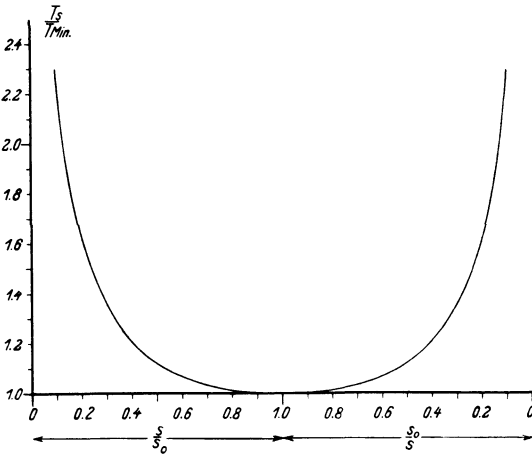


Fig. 2 **)

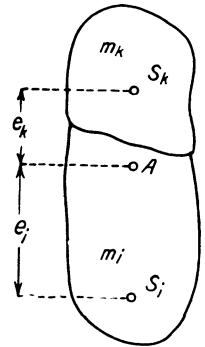


Fig. 3

doppelten Wert von s_0 . Für die Berechnung eines solchen besonders invariablen Pendels sind dann zwei Bedingungen zu erfüllen (s. Fig. 3)

$$l = \frac{\sum_i \{K_{0i} + e_i^2 \cdot m_i\}}{\sum_i m_i \cdot e_i} \dots \dots \dots (A)$$

$$\frac{l}{2} = \frac{\sum_i m_i \cdot e_i}{\sum_i m_i} \dots \dots \dots (B)$$

*) E. Kohlschütter: Über Pendelformen. Verh. d. balt.-geodät. Kom. Helsinki 1928, Anlage 9, S. 81.

**) Zieht man eine Gerade parallel zur Abszissenachse, so ergeben die beiden Schnittpunkte mit der Kurve für $\frac{T_s}{T_{\text{Min}}}$ sofort die entsprechenden Relationen für ein Reversionspendel.

und die Identität

$$\frac{l^2}{2} = \frac{\sum_i \{K_{0i} + e_i^2 \cdot m_i\}}{\sum_i m_i} \dots \dots \dots (C)$$

wenn die Schwerpunkte S_i mit A auf einer Symmetriegeraden liegen, wobei K_{0i} die Trägheitsmomente der Einzelkörper bezogen auf eine durch S_i zu A parallel gehende Achse sind. Zur Konstruktion eines Minimumpendels wird man sich für die Feinabstimmung nur zwei Parameter u und v wählen und die übrigen Größen fest vorgeben. Die Gleichungen (A) und (B) stellen dann zwei Kurven $A(u, v)$ und $B(u, v)$ in der u, v -Ebene dar, die gesuchten Werte der Parameter u_0, v_0 für ein bestimmtes T ergeben sich aus dem Schnittpunkt von den Kurven A und B . Hat man (s. Fig. 4) zwei Näherungswerte u_1 und u_2 , so kann man aus (A)

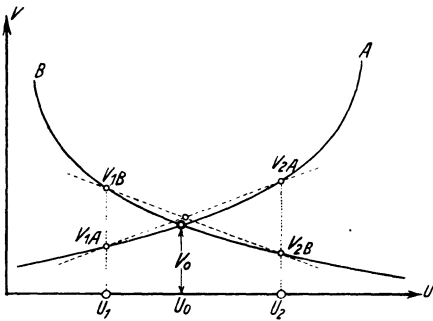


Fig. 4

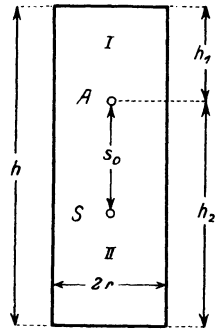


Fig. 5

bzw. (B) die entsprechenden v_{1A}, v_{1B} und v_{2A}, v_{2B} berechnen. Der richtige Wert u_0, v_0 wird in erster Näherung durch den Schnittpunkt der durch die Punkte $u_1, v_{1A}; u_2, v_{2A}$ und $u_1, v_{1B}; u_2, v_{2B}$ gehenden Geraden bestimmt, da sich jede Kurve in kleinen Intervallen durch eine entsprechende Gerade ersetzen läßt. Durch sukzessive Näherung läßt sich u_0, v_0 beliebig genau bestimmen*).

*) Die Rechnung soll für einen einfachen Kreiszylinder nach dem obigen Verfahren durchgeführt werden. Der Einfluß der Schneide und der Spiegel bleibt einfachheitshalber hier unberücksichtigt. Das Pendel (s. Fig. 5) besitze die Gesamtlänge h und den Durchmesser $2r$; die Pendellänge ist nach (A)

$$l = \frac{1}{12 s_0} (3 r^2 + h^2 + 12 s^2) \dots \dots \dots (5)$$

und gemäß (C) wird

$$s_0^3 = \frac{1}{12} (3 r^2 + h^2) = \frac{l^2}{4} \dots \dots \dots (6)$$

Führt man die Zahlenwerte $l = 20$ cm (entsprechend $T \sim 0.45$ sec) und $r = 2$ cm ein, so ergibt sich $s_0 = 10$ cm, die Teile über bzw. unter der Schneide sind $h_1 = 7.234$ cm und $h_2 = 27.234$ cm. Es ist stets möglich, unter Berücksichtigung aller Einzelteile am Pendel mehr oder minder komplizierte geschlossene Formeln für (A, B, C) zu

Endlich muß noch untersucht werden, wie genau man die Zusatzforderung (B): Schwerpunktsabstand von der Schneide = $1/2$ reduzierte Pendellänge einhalten muß. Die Halb-Schwingungsdauer T läßt sich schreiben

$$T = \pi \sqrt{\frac{l_m}{2g} \cdot \frac{1 + (2s/l_m)^2}{2s/l_m}} = T_{\text{Min}} \sqrt{\frac{1 + (2s/l_m)^2}{2 \cdot 2s/l_m}} \dots \dots (8)$$

weil für T_{Min} ja $s_0 = l_m/2$. Da nur kleine Abweichungen ϵ von dieser Forderung betrachtet werden sollen, wird in (8) $s = l_m/2 \pm \epsilon$ gesetzt, wobei $\epsilon \ll l_m/2$ ist. Die Entwicklung von (8) nach ϵ ergibt

$$T = T_{\text{Min}} \cdot \{1 + (\epsilon/l)^2\} \dots \dots \dots (9)$$

Bei diesen neuen „Minimalpendeln“ ändert sich die Schwingungsdauer infolge Verlagerung der Schneide um ϵ gemäß

$$\Delta T_\epsilon = + (\epsilon/l)^2 \cdot T_{\text{Min}} \dots \dots \dots (10)$$

In umstehender Tabelle 2 ist die Schneidenverschiebung ϵ berechnet, um eine Änderung in T_{Min} von $1 \cdot 10^{-7}$ sec hervorzurufen.

erhalten, doch wird die Ausführung dieser Rechnung meistens wenig bequem. Man denkt sich daher das Pendel aus Teilkörpern zusammengesetzt und schafft sich dann in der Höhe eines über der Achse gelegenen Schleifzylinders und in der entsprechenden Höhe eines am unteren Ende befindlichen Schleifzylinders zwei Konstruktionsvariable, durch deren Abgleichung man näherungsweise den vorgeschriebenen Bedingungen (A, B) gerecht wird. In dem Beispiel denke man sich das Pendel aus den beiden Zylindern I (r_1, h_1) und II (r_2, h_2) zusammengesetzt. Für die Formeln (A), (B) ergeben sich, wenn

$$\left. \begin{aligned} K_{01} &= \frac{r^2 \pi h_1}{12} (3r^2 + h_1^2), & e_1 &= -\frac{h_1}{2}, & K_{01} + e_1^2 \cdot m_1 &= \frac{r^2 \pi h_1}{12} (3r^2 + 4h_1^2) \\ K_{02} &= \frac{r^2 \pi h_2}{12} (3r^2 + h_2^2), & e_2 &= +\frac{h_2}{2}, & K_{02} + e_2^2 \cdot m_2 &= \frac{r^2 \pi h_2}{12} (3r^2 + 4h_2^2) \end{aligned} \right\} (7)$$

für A: $l = \frac{3r^2 + 4(h_1^2 - h_1 h_2 + h_2^2)}{6(h_2 - h_1)}$
 für B: $l = h_2 - h_1$.

Die Näherungswerte für h_2 werden vorgegeben und die entsprechenden für h_1 aus den angegebenen Gleichungen (A, B) berechnet. Es ist für

$$\begin{array}{lll} h_2 = 27.0 \text{ cm} & h_{1B} = 7.0 \text{ cm} & h_{1A} = 7.458 \text{ cm} \\ h_2 = 28.0 \text{ ,,} & h_{1B} = 8.0 \text{ ,,} & h_{1A} = 6.349 \text{ ,,} \end{array}$$

Die Geradenkonstruktion ergibt $h_2 = 27.22$ cm und $h_1 = 7.22$ cm, diese Zahlen stimmen mit den streng berechneten bis auf einige $1/10$ mm überein. Dasselbe Verfahren wird für neue Näherungswerte wiederholt:

$$\begin{array}{lll} h_2 = 27.10 \text{ cm} & h_{1B} = 7.10 \text{ cm} & h_{1A} = 7.364 \text{ cm} \\ h_2 = 27.30 \text{ ,,} & h_{1B} = 7.30 \text{ ,,} & h_{1A} = 7.166 \text{ ,,} \end{array}$$

Die Näherungskonstruktion liefert $h_2 = 27.233$ cm und $h_1 = 7.233$ cm, zwei Größen, die mit den wirklichen hinreichend übereinstimmen. Dieses sehr vereinfachte Beispiel soll nur prinzipiell zeigen, daß man bei einer einigermaßen symmetrischen Pendelform die Minimumbedingung der Schwingungsdauer für die Konstruktion leicht berücksichtigen kann.

In der Spalte für $\Delta T_{\varepsilon \text{ math}}$ ist die ε entsprechende Schwingungsdaueränderung eines isochronen mathematischen Pendels angegeben. Diese Zahlen

Tabelle 2.

$T_{\text{Min sec}}$	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
$\varepsilon \text{ mm}$	0.32	0.22	0.15	0.11	0.08	0.05	0.03
$\Delta T_{\varepsilon \text{ math}} 10^7 \text{ sec}$	1600	1400	1300	1100	1000	900	800

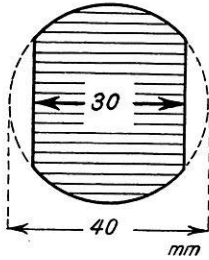


Fig. 6

zeigen deutlich, daß die „Minimalpendel“ eine recht beträchtliche „erhöhte Invariabilität“ besitzen dürften und daß man die geforderte Genauigkeitserhöhung bei den üblichen Sterneckenpendeln nicht mit der nötigen Sicherheit erlangen kann.

Für die praktische Ausführung wurde eine zylindrische Stabform von beistehendem Profil (Fig. 6) gewählt. Um unbequeme Längen und Gewichte zu vermeiden und eine Größe zu erhalten, die eventuell auch die alten Pendelapparate zu benutzen gestattet, beträgt die Halb-Schwingungsdauer der Pendel etwa 0.4 sec. In Fig. 7 ist ein solches Pendel (B) zusammen mit einem Sterneckschen Halbsekundenpendel (A) abgebildet. Die Spiegel sind aus Glas, die Schneiden aus einem Spezialstahl, um die Arretierbolzen, die das Pendel anheben und aufsetzen, in zwei Durchbohrungen eingreifen zu lassen.

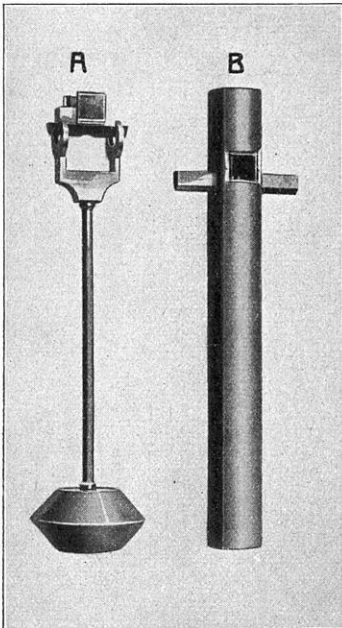


Fig. 7

Sehr wesentlich für die Konstanz der Pendel ist außer der Form die Materialfrage. Das Pendelmaterial ist außer seiner Beständigkeit mit nach seinem Temperaturkoeffizienten ausgewählt worden. Bezeichnet man durch α den linearen Ausdehnungskoeffizienten für 1° , so ergibt sich die entsprechende Änderung der Halb-Schwingungsdauer ΔT_{t^0} für t^0 in erster Näherung zu

$$\Delta T_{t^0} = \frac{\alpha}{2} t^0 \cdot T \dots \dots (11)$$

In der folgenden Tabelle 3 sind für Halbsekundenpendel aus verschiedenem Material die Temperaturkoeffizienten der Halb-Schwingungsdauern (d. h. die Halb-Schwingungsdaueränderung für 1°C in dem Bereich von 0 bis 50°) angegeben.

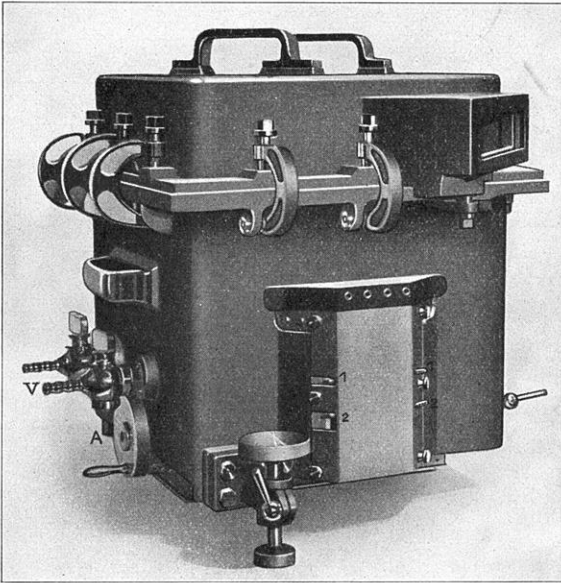


Fig. 8. Größe 1:8



Fig. 9. Größe 1:8

Tabelle 3.

Stoff	Messing	Wolfram	Eisen-Nickellegierungen			Berl. Porzellan	Quarzglas
			Indalutans	Invar	Nilex *)		
$a \cdot 10^6$	18.4	4.8	1.0	0.6	0.2	3.0	0.5
$T_0 a/2 \cdot 10^7 \text{ sec}$	46	12	2.5	1.5	0.5	7.5	1.3
$\Delta g \text{ cm sec}^{-2}$	18.4	4.8	1.0	0.6	0.2	3.0	0.5

Diese Zusammenstellung zeigt deutlich den Vorteil von Eisen-Nickellegierungen und Quarzglas. Aus technischen Gründen wurden vorerst die drei angeführten Fe-Ni-Legierungen benutzt. Der Einwand, daß der Magnetismus des Erdfeldes eine erhebliche Fälschung der Ergebnisse hervorruft, hat sich experimentell nicht bestätigen lassen, genauere Untersuchungen in weitgehend homogenen Feldern sind in Vorbereitung. Dem Vorteil des kleinen Temperaturkoeffizienten der Fe-Ni-Legierungen steht der Nachteil einer gewissen Instabilität des Materials gegenüber, die man durch eine besondere Wärmebehandlung (künstliches Altern) je nach der Vorgeschichte bis zu einem bestimmten Grade beseitigen kann**). Etwas günstiger liegen die Verhältnisse bei amorphem Quarz bzw. Quarzglas, entsprechende Pendel sind in Vorbereitung. Eine weitere Möglichkeit, den Temperatureinfluß zu kompensieren, besteht schließlich darin, die Pendel aus zwei verschiedenen Stoffen mit ungleichen Ausdehnungskoeffizienten zu bauen.

Für die Ausführung wurde eine Anordnung von vier Pendeln gewählt, die man gleichzeitig schwingen läßt, um eine weitgehende gegenseitige Kontrolle für die Konstanz der einzelnen Pendel zu haben. Wenn sich bei den praktischen Messungen die erhöhte Invariabilität durch die Form und mit dem Material in vollem Maße herausstellt, wird man selbstverständlich aus Gründen der Handlichkeit zu einem Zweipendelapparat übergehen. Aus technischen Überlegungen ist nicht — wie man statisch erwarten sollte — die runde Form gewählt, sondern eine quadratische. Fig. 8 und Fig. 9 zeigen den Pendelapparat. Das Gehäuse besteht aus einer seewasserbeständigen Al-Legierung, die Pendel schwingen in den jeweiligen Mittelpunktsdiagonalen, die Achatlager sind in eine starke Gußeisenplatte eingelassen, an der auch die gesamten Einbauteile montiert sind. Die Optik ist in Fig. 9 in der Aufsicht zu sehen. Die Doppelprismen verwandeln gleichzeitig die vertikale Bewegung des Lampenfadens in eine horizontale, um ein bequemerer Registrieren zu ermöglichen. Eine schematische Anordnung der Lichtstrahlen gibt Fig. 9 a. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, daß die Linsen gut korrigiert sind, weil ja die Abbildungen äußerst scharf sein müssen.

*) Vgl. auch Lenox-Conyngham: The Cambridge Pendulum Apparatus, The Geograph. Journal **63**, 4, 326—341 (1929), wo dieser Eisennickelstahl bereits verwandt worden ist.

***) Ch.-Éd. Guillaume: Recherches métrologiques sur les aciers au nickel. Travaux et mémoires du Bureau International des Poids et Mesures, Tome XVII. Paris 1927.

Die Temperaturmessung ist restlos auf elektrischer Grundlage mit Widerstandsthermometern durchgeführt*). Die Ablesung braucht nicht am Pendelapparat durch ein Fenster vorgenommen zu werden und kann, ohne die Messungen zu stören, integrierend über die einzelnen Pendelkammern geschehen. Die Genauigkeit ist entsprechend dem Ablesungsaufwand bei Hg-Thermometern höher und bequemer erreichbar. Der Widerstand eines Thermometers wird in einer Wheatstoneschen Brücke gemessen, deren Zusatzwiderstände W gleich als Tem-

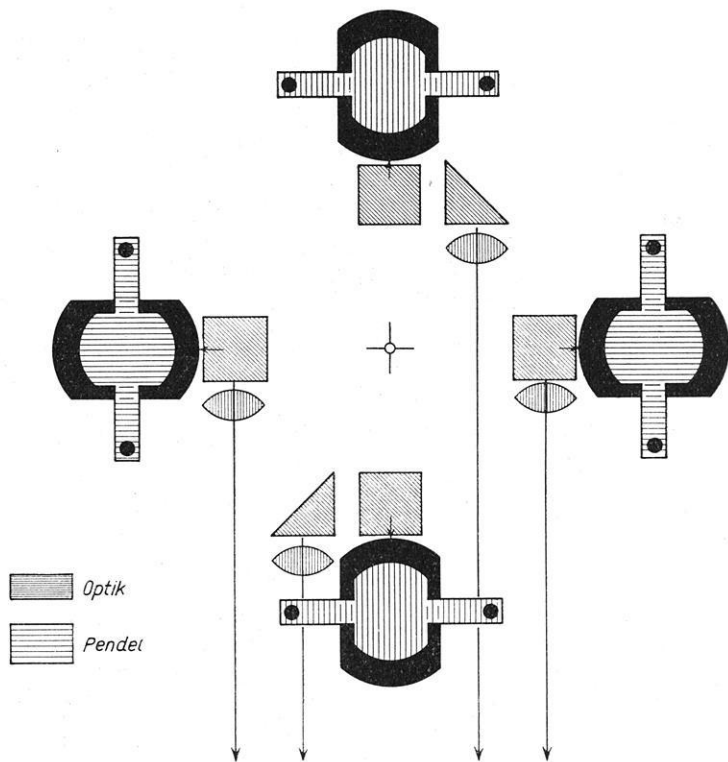


Fig. 9 a. Optik und Pendelanordnung

peraturgrade gestöpselt werden. Als Widerstandsdraht kommt Pt in Betracht (Durchmesser 0.1 mm), der auf Porzellanrohre (Fig. 10) aufgespult ist. Mit Rücksicht auf die Dimensionen und das Galvanometer wird der Widerstand zu etwa 100Ω gewählt. In Fig. 11 ist die Schaltung der Thermometer Th_i (in den einzelnen Kammern für jedes Pendel) schematisch angegeben. Die verschiedenen Thermometer $Th_1 \dots Th_4$ lassen sich durch einen Schalter R mit derselben Brücke messen. Zum Messen der Temperatur (das Galvanometer G wird stromlos gemacht)

*) Eine genauere Beschreibung und Durchführung der Rechnung und Eichung wird später veröffentlicht.

werden die entsprechenden Äquivalenttemperaturwiderstände W^0 eingestellt, die für ein mittleres Widerstandsthermometer abgeglichen sind. Da durch die Schaltung der Einfluß der Zuleitungen eliminiert ist, braucht an dem abgelesenen Temperaturwert nach einer Tabelle nur noch eine Korrektion angebracht zu werden, die folgende Größen berücksichtigt: Abweichung des Widerstandswertes und des

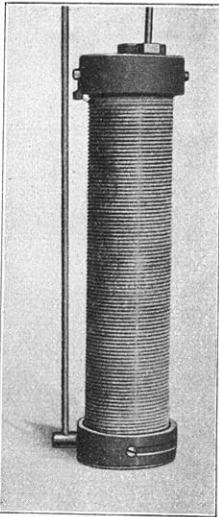


Fig. 10. Größe 1:3

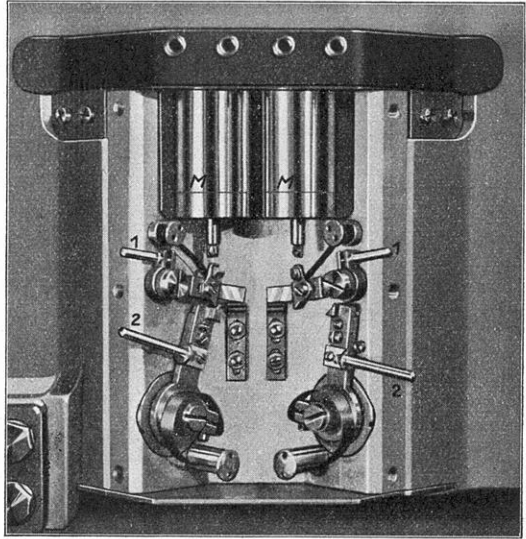


Fig. 12. Größe 1:3

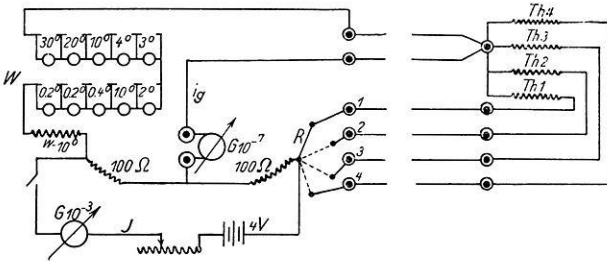


Fig. 11

Temperaturkoeffizienten vom „mittleren Thermometer“, für das die Brücke abgeglichen ist, und Abweichung der Widerstandscharakteristik (Parabel) von einer mittleren Geraden. Der Galvanometerstrom i_g wird, wenn alle Brückenwiderstände $\sim 100 \Omega$ für Pt-Thermometer bei einem Strom $J = 4$ Milliamp. und einer Temperaturänderung von 1°C annähernd 10^{-6} Amp. Um ein $\frac{1}{20}^\circ$ noch sicher ablesen zu können, wird ein Zeigerdrehspulgalvanometer von einer Empfindlichkeit von etwa $0,5 \cdot 10^{-7}$ Amp. pro Skalenteil verwandt; selbstverständlich

kann man je nach der Güte der Pendel hinsichtlich ihres Temperaturkoeffizienten entsprechend unempfindlichere Meßinstrumente nehmen.

Um die Luftdichtekorrektur der Pendel in Wegfall kommen zu lassen, wurde auf eine gute Dichtung des Apparates besonderer Wert gelegt. Wird der Apparat stets auf einen Druck $< 0,1$ mm Hg ausgepumpt, so fällt einmal die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit und auch allgemein die Barometerkorrektur weg. Die Dichtung geschieht durch eine Gummieinlage*). Die Hebel zum Anstoßen der Pendel sind ebenso wie die Arretierungsspindel mit Metallkonen durch die Wand geführt. Das Evakuieren geschieht durch eine eiserne rotierende Ölluftpumpe, die elektrisch mittels eines Benzinaggregates getrieben wird. Die Saugleistung ist so groß, daß bereits nach sehr kurzer Zeit das Auspumpen beendet ist. Für die Kontrolle des Druckes ist ein elektrisches Manometer vorgesehen.

Das Mitschwingen der Stativs wird in bekannter Weise durch zwei gegeneinander schwingende gleiche Pendel eliminiert. Um ein bequemes Anstoßen der Pendel zu ermöglichen, erfolgt die Auslösung elektromagnetisch. Fig. 12 zeigt die Auslösevorrichtung. Der Magnet *M* zieht den Sperrhebel hoch, wodurch der durch eine Feder gespannte Konus einen Hebel in der Pendelkammer bewegt, der das abgelenkte Pendel zum Ausschlagen frei gibt. Die Topfmagnete sind so gebaut, daß die Streuung der magnetischen Kraftlinien die Nickeleisenpendel nicht mehr beeinflußt. Selbstverständlich kann man so die Pendel auch einzeln über ein Kontaktwerk mit jeder beliebigen Phasendifferenz schwingen lassen. Die Hebel sind mit einer Grob- und Feinjustierung versehen, um die Pendelamplitude genau einstellen zu können. Der Stift 2 dient zum Spannen der Auslösung, während man mit dem Stift 1 die Pendel auch mit der Hand zum Schwingen bringen kann.

Da bei einer Messung gleichzeitig vier Pendel schwingen, wurde gleichzeitig nach unserem bewährten Modell**) ein entsprechender Registrierapparat für 12 cm Filmbreite gebaut, der auch eine Papierbreite von 9 und 6 cm zu benutzen gestattet.

Will man weiter gehen und eventuell die gesamte Beobachtung der Pendelschwingungen auf elektrische Grundlage stellen oder das Pendel als ausgesprochene Zeitnormale für kürzere Intervalle benutzen, so muß beim Durchgang durch die Ruhelage ein elektrischer Kontakt ausgelöst werden. Aus Gründen der Einfachheit wurde ein lichtelektrisches Relais (s. Fig. 13) gewählt. Das Licht *L* einer 4 Voltlampe (2 Watt) fällt über den Pendelspiegel auf eine Photozelle *Z*. Der schwache Photostrom (etwa Größenordnung 10^{-8} Amp.) fließt über einen hohen Widerstand (10^8 bis $10^9 \Omega$) und steuert so das Gitter *G* einer Verstärkerröhre.

*) Vgl. auch M. Knoll: Vakuumtechnische Neuerungen an Kathodenoszillographen. Zeitschr. f. techn. Phys. 1929, S. 294—299.

**) O. Meisser und H. Martin: Zur Registrierung von schnell verlaufenden Vorgängen für geophysikalische Untersuchungen. Diese Zeitschr. 2, 269 (1926).

Auf diese Weise gelingt es bequem, bei einem Abstand von über 5 m vom Pendel mit dieser relativ einfachen Apparatur noch Stromstöße von 3 Milliamp. im Anodenkreis zu erhalten. Der Anodenstrom im Relais- bzw. Galvanometer A wird durch einen entsprechenden Kreis K kompensiert. In Fig. 13 ist eine umgezeichnete Registrierung des kompensierten Stromes in A wiedergegeben. Besonders wichtig ist das scharfe Einsetzen (B) des Stromstoßes, um ein definiertes Zeitmoment von einigen $1/10000$ sec zu erhalten. Die einzelnen experimentellen Hilfsmittel und

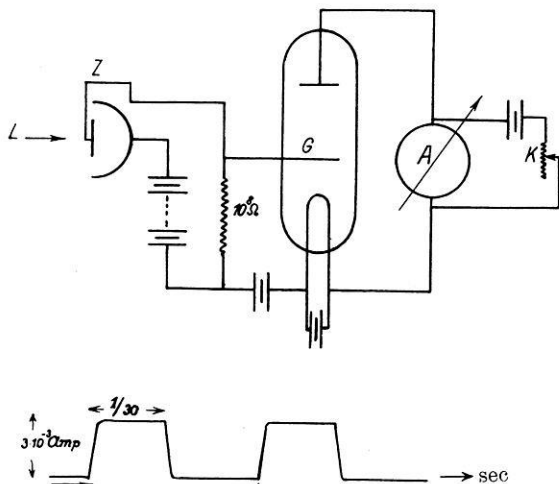


Fig. 13.

die Ergebnisse der eingehenden Untersuchung der verschiedenen Apparaturteile werden später von Herrn Th. Gengler in einer Arbeit ausführlich mit beschrieben werden.

Zusammenfassend kann man bemerken, daß bei der Konstruktion des beschriebenen Vierpendelapparates überall da, wo sich ein Weg zeigte, die jeweiligen Fehlerquellen zu verkleinern bzw. das Messen zu erleichtern, stets die neueren Fortschritte der entsprechenden physikalischen Meßmethoden herangezogen wurden.

Jena, Reichsanstalt für Erdbebenforschung, 1929.