

Werk

Jahr: 1931

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:7

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0007

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0007

LOG Id: LOG_0021

LOG Titel: Vorträge, gehalten auf der 9. Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Potsdam, 11. bis 14. September 1930

LOG Typ: section

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 there 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

Vorträge, gehalten auf der 9. Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft,
 Potsdam, 11. bis 14. September 1930

Ein statischer Schwerkraftsmesser

(Vorläufige Mitteilung)

Von **H. Haalck**, Potsdam — (Mit 4 Abbildungen)

Das Bestreben, die schwierige und umständliche dynamische Methode der Pendelmessungen durch rationellere Verfahren der Schwerkraftmessungen zu ersetzen, ist ebenso alt wie die Erkenntnis, welche Bedeutung die Kenntnis der Schwerkraftunterschiede auf der Erdoberfläche für die Erforschung der Erdkruste besitzt. Besonders in der neueren Zeit ist das Problem der Entwicklung eines auf einem statischen Prinzip beruhenden Schweremessers wegen seiner großen Bedeutung für die Fragen der Geophysik, der höheren Geodäsie, der Geologie und des praktischen Bergbaues oft erörtert worden. Es sind auch schon häufig praktische Versuche unternommen worden, ein solches Instrument zu konstruieren, die aber bis jetzt noch erfolglos geblieben sind. Im folgenden werden die Versuchsergebnisse mit einem statischen Schweremesser mitgeteilt, welcher vom Verf. im Laufe der letzten Jahre entwickelt wurde.

Von den verschiedenen Prinzipien, auf Grund deren die Konstruktion eines statischen Schweremessers möglich sein kann, erschien mir das bekannte Prinzip am aussichtsreichsten, die Schwereänderung durch die Änderung der Höhe h einer Quecksilbersäule zu messen, die durch den Druck p einer abgeschlossenen Gasmasse v im Gleichgewicht gehalten wird; es ist dann:

$$p = h \sigma g,$$

wo g die Schwerkraft, σ die Dichte des Quecksilbers bedeuten. Für differentielle Änderungen gilt:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dv}{v} + \alpha dt = \frac{dh}{h} + \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dg}{g} \quad \dots (1)$$

wo α den Ausdehnungskoeffizienten der Gase, dt die Temperaturänderung bedeutet.

Es ergibt sich aus dieser Gleichung, daß etwa eine Genauigkeit von 10^{-6} in der Messung von dh/h erforderlich ist, um noch ein Milligal Schwerkraftsänderung beobachten zu können. Um das zu erreichen, kann man das Quecksilbergemäß so an einem oder auch an beiden Enden erweitern, daß man eine möglichst große Oberfläche F des Quecksilbers erhält. Bringt man jetzt eine leichte Flüssigkeit über die Quecksilbermasse, welche bis in eine Kapillare vom Querschnitt q reicht, so hat eine Höhenänderung dh des Quecksilberspiegels eine Verschiebung des

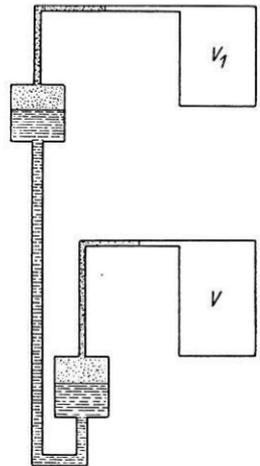


Fig. 1. Prinzip des statischen Schweremessers

Flüssigkeitsmeniskus um $dh \frac{F}{q}$ zur Folge. Diese Methode zur Erreichung der nötigen Vergrößerung wurde bereits von William Siemens 1876 bei seinen Versuchen mit dem sogenannten Bathometer*) angewandt. Die Frage der Empfindlichkeit bietet also bei der Konstruktion des statischen Schwere-

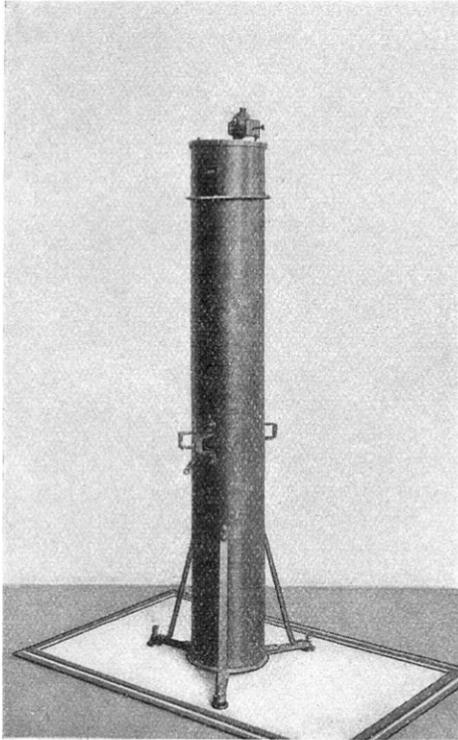


Fig. 2.

Gesamtansicht des statischen Schweremessers

messers keine Schwierigkeiten, da sie nur von den Dimensionen abhängt und nach Belieben gesteigert werden kann.

Betrachten wir den Einfluß der Temperaturänderung auf die Messungen, so ergibt sich aus der obigen Gleichung (1), daß eine Temperaturänderung um

$$dt = \left(0.000\ 293 + 293 \frac{dv}{v} \right) ^\circ\text{C}$$

(also etwa von der Größenordnung von 0.001°C) einen Ausschlag des Meniskus hervorruft, der einem Milligal Schwereänderung entsprechen würde. Diese Tatsache läßt die ganze Schwierigkeit des Problems erkennen: Es muß auf den ersten Blick als technisch unmöglich erscheinen, eine derartige Temperaturkonstanz zu erzielen bzw. die Temperatur mit einer solchen Genauigkeit zu messen oder eine hinreichend genaue Temperaturkompensation zu konstruieren. In gleichem Maße erschwerend kommt noch hinzu, daß nicht nur die Temperaturänderung an sich einen so großen Einfluß aus-

*) William Siemens: Der Bathometer. Berlin 1878.

Theoretische Überlegungen gaben mir die Überzeugung, daß doch eine Lösung dieser Aufgabe möglich sein müßte auf Grund einer Temperaturkompensation nach folgendem Prinzip: Der Raum v wird sehr groß gemacht und in möglichst viele Einzelräume unterteilt; dasselbe erfolgt mit dem Raum v_1 . Die Teilräume von v_1 bzw. v werden einzeln ineinander geschachtelt, wobei das Material und die Dimensionen so gewählt werden, daß infolge der verschiedenen Ausdehnung des Materials die Teilräume von v bzw. v_1 sich derart in der Größe ändern, daß der Temperatureinfluß gerade kompensiert wird. Diese Temperaturkompensation wird bei jedem einzelnen ineinander geschachtelten Teilraumpaar für sich durchgeführt. Das hat folgende Vorteile: Zunächst werden Temperaturungleichheiten sich nicht so störend bemerkbar machen, da die kleinen Teilräume in sich viel schneller und besser Temperaturgleichheit erreichen, außerdem ein Fehler nur prozentual zum Gesamtraum eingeht. Sodann wird, da nur das Mittel aus der Wirkung sämtlicher Teilräume in die Messungen eingeht, sich eine um so größere Sicherheit der Temperaturkompensation ergeben, je größer die Zahl der Einzelräume ist. Auf diese Weise kann auch die Sicherheit der Kompensation des Temperatureinflusses mit den Dimensionen des Instruments gesteigert werden.

Fig. 2 zeigt die Ansicht des ersten gebauten Versuchsinstrumentes, mit welchem praktische Messungen ausgeführt werden konnten; es besitzt eine Höhe von etwa 160 cm, ein Gesamtgewicht von 40 bis 45 kg. Die Grundgleichung für die Ablesungen ist:

$$dg = C_1 (dx' - dx) + C_2 dt. \dots \dots \dots (2)$$

Hierin bedeuten dx' die Verschiebung des unteren, dx diejenige des oberen Meniskus, C_1 und C_2 die sich aus den Dimensionen des Instruments ergebenden Apparatkonstanten.

Der Skalenwert C_1 ergibt sich rechnerisch aus den Dimensionen des Instruments zu

$$C_1 = 0.0175 \text{ bis } 0.0187.$$

Es gibt aber noch einen einfachen Weg, um den Skalenwert C_1 auch experimentell zu ermitteln, nämlich durch Neigung des Instruments; es ist dann bei konstanter Temperatur:

$$dg = g (\cos \delta - 1) = C_1 (dx' - dx) \dots \dots \dots (3)$$

wo δ den Winkel bedeutet, um welchen das Instrument aus der Vertikalen heraus geneigt wird. Die Neigung des Instruments erfolgt mit Hilfe der drei Fußschrauben jedesmal nach beiden Seiten (10 Umdrehungen = 82' Neigung):

Fußschraube	δ	x'	x	dx'	dx	$dx' - dx$
I	0	8.4	1.5			
	+ 82'	1.5	8.25	- 7.0	+ 6.8	- 13.8
	0	8.5	1.35			
	- 82'	0.2	9.5	- 8.4	+ 8.2	- 16.6
	0	8.7	1.2			

Fußschraube	δ	x'	x	dx'	dx	$dx' - dx$
II	0	8.9	1.1			
	+ 82'	1.9	8.05	- 7.0	+ 6.95	- 13.95
	0	8.9	1.1			
	- 82'	0.5	9.5	- 8.4	+ 8.35	- 16.75
	0	8.9	1.2			
III	0	9.1	0.9			
	+ 82'	1.7	8.2	- 7.55	+ 7.45	- 15.0
	0	9.4	0.6			
	- 82'	1.35	8.6	- 8.1	+ 8.0	- 16.1
	0	9.5	0.6			

Aus der obigen Gleichung folgt für hinreichend kleine Neigungen:

$$C_1 = - \frac{g \cdot \delta^2}{2(dx' - dx)} \dots \dots \dots (3a)$$

Da die Libellen nur relativ und nicht absolut die vertikale Stellung des Apparats angeben, muß die Berechnung von C_1 wie folgt geschehen:

Bedeutet δ_1 die jeweilige Neigung nach der einen, δ_2 diejenige nach der anderen Seite — entsprechend die Ausschläge $(dx' - dx)_1$ bzw. $(dx' - dx)_2$ —, so folgt aus Gleichung (3a):

$$\delta_1 = \delta_2 \sqrt{\frac{(dx' - dx)_1}{(dx' - dx)_2}}$$

außerdem ist:

$$\delta_1 + \delta_2 = 164'.$$

Daraus ergibt sich mit den angegebenen Werten:

	δ_1	δ_2
I	78.2'	85.8'
II	78.2	85.8
III	80.8	83.2

und der Skalenwert nach Gleichung (3a):

	C_1	
I	0.0184	0.0185
II	0.0182	0.0183
III	0.0181	0.0186

$$\text{Mittel: } C_1 = 0.01835 \pm 0.00008.$$

Der experimentell ermittelte Skalenwert stimmt also mit dem rechnerisch aus den Dimensionen des Apparats gefundenen Wert sehr gut überein. Ein Millimeter Ausschlag eines Meniskus entspricht demnach einer Schwerkraftsänderung von 1.83 Milligal.

Die größte Unsicherheit haftet naturgemäß dem Temperaturglied $C_2 \cdot dt$ an. Wäre überhaupt keine Temperaturkompensation vorhanden, so wäre C_2 etwa gleich 3 bis 4, d. h. 1° C Temperaturänderung würde einer Schwereänderung von 3000 bis 4000 Milligal entsprechen; ist die Temperaturkompensation eine vollkommene, so müßte $C_2 = 0$ sein. Es ist aber sehr schwierig, die Temperaturkompensation vollständig auszuführen oder Temperaturungleichheiten im Instru-

ment vollkommen zu vermeiden. Jedoch ist es, wie die folgenden Messungsreihen zeigen, praktisch in weitgehendstem Maße geglückt:

Das Instrument war aufgestellt im großen Instrumentensaal des geodätischen Instituts ohne besonderen Temperaturschutz und blieb während reichlich einer Woche stehen, wobei täglich Ablesungen vorgenommen wurden. Die ausgezogene Kurve (Fig. 3) zeigt den Verlauf der Einstellung (in Milligal), die gestrichelte den Verlauf der Temperatur, und zwar derjenigen der umgebenden Luft, die natürlich nicht mit derjenigen im Innern des Instruments gleichzusetzen ist, besonders nicht bei Temperaturänderungen. Die Temperaturunterschiede waren naturgemäß zwischen Tag und Nacht erheblich größer, und besonders in den Morgenstunden

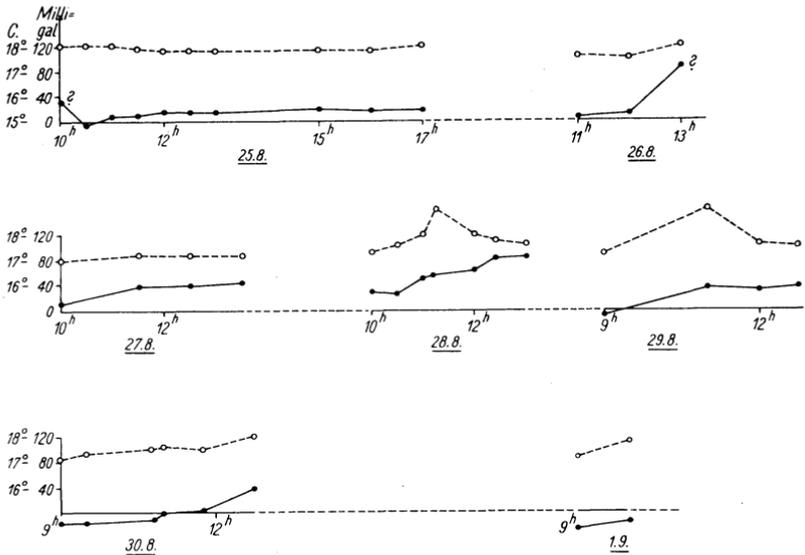


Fig. 3. Einfluß der Temperaturänderungen auf die Einstellung

fanden stärkere Temperaturänderungen statt, als die Kurve sie anzeigt. Die erste Messung am 25. August fällt heraus, weil das Instrument gerade neu eingestellt worden war, die Messung am 26. August um 13 Uhr ebenfalls, weil das Instrument oben geöffnet und Besuchern gezeigt worden war. Sonst sind keine herausfallenden Werte vorhanden. Die Messungen lassen erkennen, daß die Einstellung nur noch in sehr geringem Maße von der Temperatur abhängig ist; die Abweichungen vom Mittelwert sind nur klein, besonders eben im Hinblick darauf, daß ohne Temperaturkompensation ein Grad Temperaturänderung einem Schwereunterschied von etwa 3000 bis 4000 Milligal entsprechen würde. Bei dem gebauten Versuchsinstrument beträgt diese nur noch höchstens 20 bis 40 Milligal, und zwar ist, da bei steigender Temperatur die Ablesung zunimmt, während ohne Temperaturkompensation das Umgekehrte der Fall sein muß, die Temperatur schon etwas überkompen-

siert. Es liegt nahe, den Faktor C_2 experimentell zu bestimmen und das Glied $C_2 \cdot dt$ als Korrektionsglied zu berücksichtigen; doch erscheint dies als ziemlich unsicher, da bei jeder Temperaturänderung Ungleichheiten entstehen, die unkontrollierbar bleiben, und man nicht genau wissen kann, ob die Temperatur, die man bei der Rechnung einsetzt, auch wirklich der Temperatur der Einzelräume entspricht. Vielmehr ist es ratsamer, das Temperaturglied $C_2 \cdot dt$ hinreichend klein zu halten, dadurch, daß der Schwermesser von einem auf konstanter Temperatur gehaltenen Raum umgeben wird, was sich technisch mit Hilfe eines Temperaturreglers wohl bis auf Schwankungen von etwa $1/4$ bis $1/10^\circ$ C erreichen läßt.

Es sind dann noch weitere Versuche mit dem Instrument ausgeführt worden, zunächst um die Transportfähigkeit des Apparats zu prüfen. Der Schwermessermesser wurde hin und her gestellt, die Treppen im Institut hinauf und hinunter getragen usw. Dabei entstehen in den Kapillaren infolge der Erschütterungen Blasen, die aber mit Hilfe einer besonderen Verstellvorrichtung beseitigt werden können. Es ergaben sich bei den Messungen nach den Transporten Unterschiede in der Einstellung, die selten einen Betrag von 10 Milligal überstiegen. Ein Beispiel einer solchen Messungsreihe an einem Punkte nach jedesmaligem Transport des Instruments zeigt folgende Tabelle (29. September 1930):

x'	x	dx'	dx	$18.3 (dx' - dx)$ (in Milligal)
4.25	5.75	0	0	0
4.35	5.65	- 0.1	+ 0.1	- 4
4.4	5.6	- 0.15	+ 0.15	- 5
4.1	5.9	+ 0.15	- 0.15	+ 5
4.1	5.9	+ 0.15	- 0.15	+ 5
4.1	5.9	+ 0.15	- 0.15	+ 5
4.0	6.0	+ 0.25	- 0.25	+ 9
4.0	6.0	+ 0.25	- 0.25	+ 9
4.0	6.0	+ 0.25	- 0.25	+ 9
4.1	6.0	+ 0.15	- 0.25	+ 7
Mittelwert:				+ 4

Die maximale Abweichung von dem Mittelwert beträgt 9 Milligal; der mittlere Fehler einer einzelnen Beobachtung ist bei dieser Messungsreihe etwa ± 5 Milligal. Nur wenn man eine Blasenbildung am Ende der Kapillaren bei der Ablesung übersieht, erhält man einen stark herausfallenden Wert. Die Unsicherheit ist zum Teil wohl auf die Temperatur zurückzuführen — es wurden keine besonderen Wärmeschutzvorrichtungen bei den Messungen benutzt —, zum Teil aber auch auf Ungleichheiten in der Benetzung der Glaswandung, da beim Zurückgehen der Flüssigkeitsmenisken stets etwas Flüssigkeit an den Wänden haften bleibt. Erschütterungen stören die Einstellung nicht, sind im Gegenteil eher vorteilhaft für die sichere Einstellung der Menisken. Eine Messung nimmt höchstens 2 bis 5 Minuten in Anspruch, und da man die abgelesenen Werte nur mit der Konstanten 0.0183 zu multiplizieren braucht, hat man das Resultat sofort in Händen, so daß auch jeder Nichtfachmann ohne weiteres mit dem Instrument arbeiten kann.

Der Libelleneinfluß ist sehr gering, da die Neigung des Apparats nur mit dem Kosinus des Neigungswinkels in die Ablesung eingeht. Eine Abweichung von etwa 5' von der Vertikalen hat erst einen Fehler von einem Milligal zur Folge. Neigungen, die stärker sind als etwa 20 bis 25°, muß man vermeiden, da sonst die Flüssigkeit durch die Kapillare in den Raum v_1 strömt; noch stärkere Neigungen haben eine Zerstörung der gesamten Meßvorrichtung zur Folge*).

Zusammengefaßt ist das Ergebnis dieser Experimente, daß man mit dem ersten Versuchsapparat schon Schwereunterschiede mit einer Sicherheit von etwa 10 Milligal beobachten kann. Obwohl das Instrument noch nicht für praktische Geländemessungen eingerichtet ist, ließen die günstigen Versuchsergebnisse solche Messungen — vorausgesetzt, daß die Schwereunterschiede groß genug waren —, schon als möglich erscheinen. Es wurden daher Messungen des Schwereunterschieds zwischen der unteren und der oberen Haltestelle des Fahrstuhls im Funkturm von Berlin-Wilmersdorf ausgeführt. Der Höhenunterschied beträgt 120 m, so daß die Schwerkraft an der oberen Haltestelle um 37 Milligal kleiner sein muß als unten. Um den Betrieb nicht zu stören, konnten die Messungen erst nach Mitternacht vorgenommen werden. Das ist für die Beobachtungen in dieser Jahreszeit äußerst ungünstig, da die wesentlichste Bedingung für ein gutes Arbeiten des Instruments, nämlich die Konstanz der Temperatur, am wenigsten erfüllt wird. So betrug am 2. Oktober, an welchem Tage die Messungen**) ausgeführt wurden, die Temperatur:

Im Instrumentensaal des geodätischen Instituts	13.2° C
Bei der Abfahrt aus Potsdam (im Auto)	9° C
Bei der Ankunft am Funkturm (im Auto)	3° C
Im Fahrstuhl	8° C

Im Fahrstuhl stieg die Temperatur während der Messungen infolge der Anwesenheit mehrerer Personen in dem engen Raum bis auf 16° C, um dann wieder auf 14.5° C zu sinken. Naturgemäß konnte unter solchen Umständen nicht die Beobachtungsgenauigkeit erreicht werden, welche das Instrument unter günstigen Temperaturverhältnissen besitzt. Fig. 4 zeigt das Ergebnis der Messungen in graphischer Darstellung, der Zeit T als Abszisse, der Ablesung $x' - x$ als Ordinate; die Punkte bedeuten die abgelesene Einstellung am unteren, die Kreise diejenige am oberen Beobachtungspunkt; die Zeitpunkte der einzelnen Ablesungen sind nicht genau, da nur nach jedesmaligen Wechsel des Beobachtungspunktes die Zeit abgelesen wurde.

Die Messungen lassen ohne weiteres als sicheres Ergebnis erkennen, daß die Schwerkraft am Fußpunkt des Turmes erheblich größer ist als oben. Die Größe dieses Unterschiedes wird jedoch durch den erkennbaren Temperaturgang sehr verschleiert. Dieser Temperaturgang, der durch die beschriebenen Umstände verursacht wird, zeigt Unregelmäßigkeiten und ein starkes Nachhinken, was beides zu erwarten war. Um 2^h 10^m mußte eine Neueinstellung er-

*) Ein Verpacken und Verschicken des Instruments ist daher nicht möglich.

**) An den Messungen nahmen die Herren Berger und Dr. Jung vom geodätischen Institut teil.

folgen, da die Flüssigkeitsmenisken sich bis an den Rand des Meßbereichs hin verschoben. Bei der vorletzten Messung wurde die Tür des Aufzugs geöffnet; der Einfluß der hereinströmenden kalten Luft macht sich bei der letzten Messung bemerkbar. Einflüsse anderer Art, wie z. B. das Schwanken des Turmes usw.,

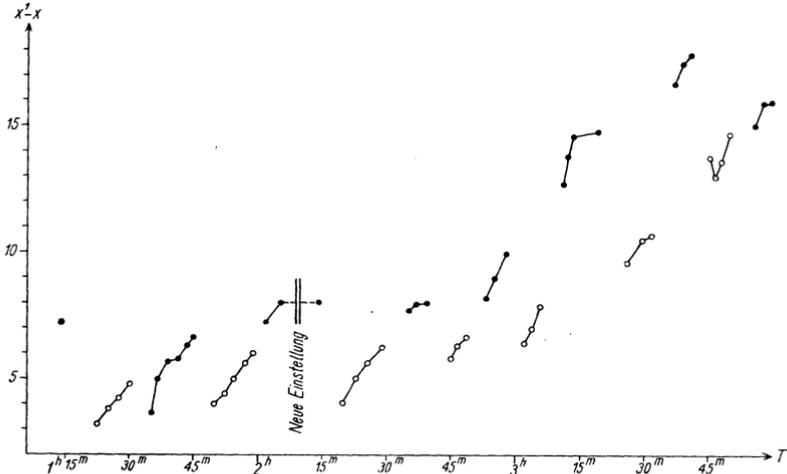


Fig. 4. Beobachtungsergebnisse mit dem statischen Schweremesser auf dem Funkturm von Berlin-Wilmersdorf

waren nur in sehr geringem Maße festzustellen. Berücksichtigen wir nur die Messungen von 1^h 15^m bis 3^h 10^m, bei welchen der Temperatureinfluß noch nicht so stark ist, so erhält man folgendes Ergebnis:

Beobachtungs- punkt	Mittelwert der Ablesungen		$d x' - d x$	Schwere- unterschied (unten — oben) in Milligal
	x'	x		
Unten	8.6	1.3		
Oben	6.9	2.9	3.3	60
Unten	7.7	2.2	1.5	28
Oben	7.5	2.5	0.5	9
Unten	8.8	1.2	2.6	47
Neueinstellung				
Unten	4.0	6.0		
Oben	2.7	7.3	2.6	47
Unten	3.9	6.0	2.5	46
Oben	3.1	6.8	1.6	29
Unten	4.5	5.5	2.7	49
Oben	3.6	6.4	1.8	33

Mittelwert: 39

gegenüber einem wirklichen Unterschied von 37 Milligal

Berücksichtigt man die ungünstigen Temperaturverhältnisse, so muß das Resultat der Messungen als vollkommen befriedigend angesehen werden.

Was nun die Schlußfolgerungen aus den bisherigen Versuchsergebnissen in bezug auf die Weiterentwicklung des statischen Schweremessers anbelangt, so ist zunächst zu beachten, daß die Dimensionen des ersten Versuchsapparates nur von dem Gesichtspunkte aus gewählt wurden, daß man 1 Milligal Schwereänderung noch ablesen konnte. Die vorhandenen Fehlerquellen, das sind das ungleichmäßige Benetzen der Kapillarwandung und die Temperaturänderungen, lassen sich aber mit der Vergrößerung der Dimensionen bis zu einem unwesentlichen Betrag verringern. Es ist daher jetzt mit dem Bau eines Instruments begonnen, welches — außer den für die technische Vervollkommnung sich ergebenden Änderungen — folgende Verbesserungen zeigt:

Die Empfindlichkeit wird auf etwa das 12fache gesteigert (1 Milligal = etwa 6 mm Ausschlag eines Meniskus). Dadurch wird die Fehlerquelle, die aus dem ungleichmäßigen Haften der Flüssigkeit an den Wänden der Kapillaren beim Zurückgehen der Menisken entsteht, unwesentlich. Das Wesentlichste ist aber, daß man mit der Vergrößerung der Dimensionen auch die Sicherheit der Temperaturkompensation ebenfalls in etwa demselben Verhältnis verbessern kann dadurch, daß man die Zahl der ineinander geschachtelten Teilräume vergrößert und in symmetrischer Form im Instrument anordnet. Außerdem wird noch eine Vorrichtung angebracht, mit Hilfe deren man die letzte Feinabstimmung der Temperaturkompensation empirisch ausführen kann; der Meßbereich wird auf etwa 1000 Milligal gesteigert. Die Gesamthöhe des Instruments wird etwa 1.80 m, der Durchmesser 60 cm, das Gewicht etwa 100 bis 150 kg betragen. Eine weitere Erhöhung der Beobachtungssicherheit läßt sich dadurch erzielen, daß der Apparat umgeben wird zunächst von einer Wärmekapazität, dann von einem Raum, der mit Hilfe eines Temperaturreglers automatisch auf konstanter Temperatur gehalten wird. Die kleinen Schwankungen der Temperatur um den Mittelwert werden dann durch die Wärmekapazität (Wasser) ausgeglichen. Für die praktischen Messungen im Gelände ist gedacht, das Instrument auf ein Auto zu montieren mit kardanischer Aufhängung; um es auch für Messungen auf Schiffen bzw. Luftschiffen verwenden zu können, sind zur Dämpfung der infolge der vertikalen Beschleunigungen entstehenden Schwankungen Dämpfungsvorrichtungen vorgesehen.

Auf Grund der bisherigen Versuchsergebnisse hoffe ich mit Hilfe der angeführten Verbesserungen das Problem des statischen Schweremessers in kurzer Zeit zu einer vollständig befriedigenden Lösung bringen zu können, d. h. das Instrument soweit zu entwickeln, daß es Schwereunterschiede mit einer Sicherheit von mindestens ± 1 Milligal zu messen gestattet*).

*) Die Entwicklung des Instruments, mit der ich vor etwa drei Jahren begann, wurde im wesentlichen mit eigenen Mitteln ausgeführt. Nachdem aus Mangel an weiteren Mitteln der Bau wiederholt eingestellt werden mußte, stellte die Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft die Mittel zur endgültigen Fertigstellung des Instruments zur Verfügung, wofür ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte.

Erhöhung der Empfindlichkeit der Hebelwaage durch ein Horizontalpendel

(Erste Mitteilung,
zugleich als Vortrag gehalten auf der Tagung des Gauvereins Sachsen-Thüringen-
Schlesien der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Halle am 15. u. 16. Juni 1930)

Von **G. Schmerwitz** — (Mit 2 Abbildungen)

Zur Bestimmung des vertikalen Gradienten der Schwere $\partial^2 W / \partial Z^2$ muß die relative Genauigkeit der Hebelwaagen, die etwa 10^{-8} beträgt, um den 200fachen Betrag erhöht werden, falls man diesen Gradienten mit derselben Genauigkeit wie die horizontalen Größen bestimmen will. Durch Kombination der Hebelwaage mit einem kleinen Horizontalpendel wird die Empfindlichkeit dieser Waage um mehr als den geforderten Betrag erhöht. Mit einem experimentellen Beispiel wird die praktische Brauchbarkeit dieses Prinzips erwiesen.

Mit der Drehwaage kann man die horizontalen Gradienten der Schwerkraft mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-12} bestimmen. Bei der Messung des vertikalen Gradienten hat man diese Grenze bisher noch nicht erreicht. Für die vollständige Ermittlung der Potentialflächen der Schwere, sowie für die geophysikalische Bodenforschung ist eine gleich genaue Bestimmung des vertikalen Gradienten schon seit langem erwünscht.

Die Messung dieses Gradienten ist gleichbedeutend mit der Aufgabe den Gewichtsunterschied einer Masse in verschiedenen Höhen zu ermitteln. Läßt man im praktischen Falle eine Gewichtsverschiebung von etwa 50 cm zu, wobei auf jedes Gewicht 25 cm Verschiebung entfallen, so besteht die Forderung, eine Wägung mit einer relativen Genauigkeit von $0.5 \cdot 10^{-10}$ durchzuführen; d. h. ein Gewicht von 1 kg soll bis auf $0.5 \cdot 10^{-4}$ mg genau bestimmt werden. Mit den besten Hebelwaagen kann man nun eine relative Genauigkeit von 10^{-8} erreichen. Unter den günstigsten Bedingungen und bei äußerster Ausnutzung optischer Vergrößerung kommt man noch etwas weiter. Die Hebelwaagen bleiben also noch mit einem nahezu 100fachen Betrag unter der geophysikalisch geforderten Genauigkeitsgrenze.

Eine Methode, mit der man ohne kostspielige Hilfsmittel die oben angegebene Genauigkeit erreichen kann, soll im folgenden kurz beschrieben werden. In der Geophysik wird zur Registrierung von langsamen Bodenbewegungen wie zur Bestimmung äußerst geringer Bodenneigungen das Horizontalpendel verwendet. Mit einem solchen Pendel hat man Neigungen des Bodens bis auf $1/10000$ Bogensekunde genau nachweisen können. Diese Eigenschaft der Empfindlichkeit gegen Neigungen der Unterlage kann man sich leicht auch für eine Empfindlichkeitsvergrößerung der Hebelwaage zunutze machen.

Für ein solches in nahezu horizontaler Ebene schwingendes Pendel besteht die Beziehung:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \cdot \sin \varphi}}.$$

Die Vergrößerung der Schwingungsdauer durch die Neigung φ hat für die Seismometerkonstruktion Interesse. Für uns ist hier nur der Faktor $\sin \varphi$ von Bedeutung, der für kleine Winkel mit φ (im Bogenmaß) gleich wird. Dieser Winkel reziprok genommen bestimmt die Neigungsvergrößerung des Horizontalpendels. Neigen wir die Pendelachse um einen Winkel α , so ist der Winkel ψ , um den sich dann das Pendel um diese Achse selbst dreht:

$$\psi = 1/\varphi \cdot \alpha,$$

$1/\varphi$ ist also die Vergrößerung.

So erhält man z. B. für:

$$\varphi \sim 3', \quad 1/\varphi \sim 1000.$$

Bringt man nun ein solches Horizontalpendel auf einer Waage an, z. B. so, daß es in der Mitte etwas über der Schneide mit dem Pendelarm senkrecht zum Waagebalken steht (Fig. 1), so hat man damit zwei Fortschritte zugleich erzielt: eine Vergrößerung der absoluten Empfindlichkeit sowie eine Vergrößerung der Ablesegenauigkeit. Hierbei ist als absolute Empfindlichkeit die Neigung des Waagebalkens in Graden pro 1 mg Überbelastung zu verstehen, während als Empfindlichkeit im allgemeinen der Ausschlag in beliebigen Skalenteilen pro 1 mg angegeben wird. Daß hierdurch auch eine Erhöhung der absoluten Empfindlichkeit erreicht ist, kann man leicht einsehen. Ohne Horizontalpendel würde eine Waage beispielsweise einen Ausschlag von 1° geben bei 1 mg Belastung. Mit Horizontalpendel wäre die Waage bei dieser Neigung noch nicht im Gleichgewicht, da sich ja das Pendel in derselben Richtung wie der Waagebalken um einen vielfachen Betrag gedreht hat. In Fig. 1 würde sich das Horizontalpendel bei 1° Balkenneigung z. B. von M nach M' drehen. Es greift jetzt auf dieser Seite noch mit einem Hebelarm $M_H \cdot l_H \cdot \sin \psi_2$ an, wodurch eine Vergrößerung der Drehung des Waagebalkens in dieser Richtung verursacht wird. (Hier ist M_H = Masse des Pendels, l_H Länge des Pendelarms.) Diese Drehung bewirkt nun wieder eine Drehung des Horizontalpendels usw., bis auch hier eine Ruhelage, jedoch bei einem weit größeren Winkel (ψ_2) erreicht wird.

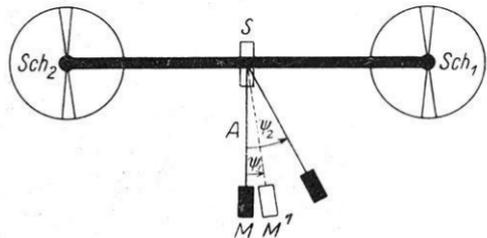


Fig. 1

Ohne Horizontalpendel würde eine Waage beispielsweise einen Ausschlag von 1° geben bei 1 mg Belastung. Mit Horizontalpendel wäre die Waage bei dieser Neigung noch nicht im Gleichgewicht, da sich ja das Pendel in derselben Richtung wie der Waagebalken um einen vielfachen Betrag gedreht hat. In Fig. 1 würde sich das Horizontalpendel bei 1° Balkenneigung z. B. von M nach M' drehen. Es greift jetzt auf dieser Seite noch mit einem Hebelarm $M_H \cdot l_H \cdot \sin \psi_2$ an, wodurch eine Vergrößerung der Drehung des Waagebalkens in dieser Richtung verursacht wird. (Hier ist M_H = Masse des Pendels, l_H Länge des Pendelarms.) Diese Drehung bewirkt nun wieder eine Drehung des Horizontalpendels usw., bis auch hier eine Ruhelage, jedoch bei einem weit größeren Winkel (ψ_2) erreicht wird.

Die vereinfachte Empfindlichkeitsbeziehung, die bei einer gewöhnlichen Hebelwaage für die absolute Empfindlichkeit:

$$\frac{\varphi}{p} = \frac{l}{M \cdot d}$$

lautet, bekommt bei einer Waage mit Horizontalpendel die Form:

$$\frac{\varphi}{p} = \frac{l}{M \cdot d - c \cdot M_H \cdot l_H}.$$

Hier ist M = Masse des Waagebalkens, $2l$ = Länge des Balkens, d = Abstand der Mittelschneide vom Schwerpunkt des Balkens, c = Vergrößerungsfaktor des Horizontalpendels ($= 1/\varphi$)

Die einzige Möglichkeit, die absolute Empfindlichkeit nach der alten Formel wesentlich zu vergrößern, bestand darin, den Nenner sehr klein zu machen. Da man hierbei aber mit d zu extrem kleinen Werten hätte gehen müssen, war diesem Wege praktisch bald eine Grenze gesetzt. Demgegenüber kann man

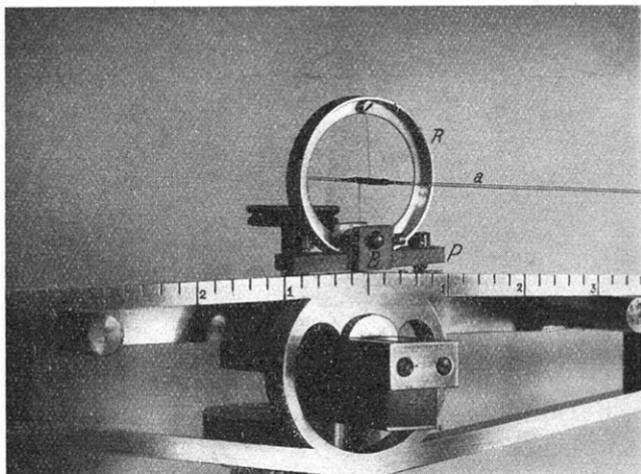


Fig. 2

jetzt dieses Ziel — den Nenner klein zu machen — nach der neuen Formel leicht erreichen, ohne daß man eine der Größen zu extremen Werten treibt. Denn im Nenner steht eine Differenz!

Nach diesem Prinzip wurden mit einer alten langarmigen Hebelwaage provisorische Versuche ausgeführt*). Diese Waage besaß ohne Horizontalpendel eine Empfindlichkeit von 2 Skalenteilen pro 1 mg. Durch Anbringung eines Horizontalpendels mit Zöllnerscher Aufhängung (Fig. 2) wurde die Empfindlichkeit pro Skalenteil um etwa das 200fache vergrößert. Hierbei kam nicht ganz die 10fache Vergrößerung auf eine Steigerung der absoluten Empfindlichkeit, die etwa 20fache auf die durch die Neigung des Horizontalpendels — also den Faktor c oder $1/\varphi$. Der Neigungswinkel der Horizontalpendelachse gegen die Vertikale betrug ungefähr 20° . Das Pendel selbst (in Fig. 2 mit a bezeichnet)

*) Die Waage stellte Herr Prof. Jentzsch in freundlicher Weise zur Verfügung.

bestand aus einer Glaskapillare von etwa 14 cm Länge, 100 mg Gewicht und war mit je zwei 16,7- μ -Drähten aus Wolfram mit Zöllnerscher Aufhängung befestigt. Das gesamte Zusatzsystem bestand aus dem Ring R und der hiermit fest verbundenen Platte P . Durch Verstellen der beiden Fußplattenschrauben konnte der Nullpunkt des Horizontalpendels verändert werden. Der Winkel der Horizontalpendel-Drehachse gegen die Vertikale — also die Neigungsempfindlichkeit des Pendels — wurde durch Verschieben des Bolzens B eingestellt. Diesen konnte man dann durch eine seitliche Schraube festklemmen. Der untere Faden der Zöllnerschen Aufhängung war an diesem Bolzen befestigt.

Die Waagenschwingungsdauer hatte bei dieser Wahl der Systemkonstanten eine bei Hebelwaagen sonst unerwünschte Vergrößerung erfahren. Jedoch waren hier infolge der etwa 20fach vergrößerten Bewegung des Horizontalpendels die Schwingungen der gesamten Waage so stark gedämpft, daß die Ruhelage immer nach etwa 2 Minuten direkt abgelesen werden konnte. Diese war dann trotz Arretieren und Desarretieren bei einer Belastung von 20 g bis auf $\frac{1}{1000}$ mg — der Ablesegrenze — reproduzierbar. Die Vermutung, daß die Schneiden der Waage eine solche Vergrößerung der Empfindlichkeit nicht zulassen würden, zeigte sich somit als unzutreffend. Zur Kontrolle der Horizontalpendelwaage wurde parallel mit dieser eine Wägung auf einer Mikrowaage durchgeführt, deren Genauigkeit ungefähr dieselbe war. Es ergaben die beiden Wägungen für ein und denselben Gegenstand eine Übereinstimmung im Gewicht bis auf weniger als 0.01 mg (bei etwa 20 g Belastung). Mehr als 0.01 mg konnte man aus den Waagen nicht herausholen, da sie keinen für derartige Empfindlichkeiten angemessenen thermischen Schutz besaßen.

Die statische Behandlung des Problems ist hiermit in kurzen Zügen gegeben. Durch günstige Auswahl der zur Verfügung stehenden Größen und Konstanten des Horizontalpendels, wie M_H , l_H und $1/q$, läßt sich die Genauigkeit jeder Hebelwaage hiernach leicht auf den 1000fachen Betrag bringen. Sowohl die Bestimmung der günstigsten Werte für die Wahl des Horizontalpendels wie die dynamische Behandlung der Vorgänge erfordern noch eine Menge wichtiger Untersuchungen. Daß diese jedoch einen Gegenstand von erfolgversprechender und weitgehender praktischer Bedeutung betreffen, ist durch die bisher angestellten Versuche wohl als erwiesen anzunehmen. Eine so wesentliche Erhöhung der Genauigkeit von Wägungen ist ja nicht nur für die zu Anfang erwähnten geophysikalischen Probleme, sondern allgemein für die Physik wie physikalische Chemie von Bedeutung. Der experimentelle Teil dieser Untersuchungen wird jetzt in einem in bezug auf thermische Bedingungen besser geeigneten Raum in der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena unter Leitung von Herrn Geheimrat Hecker systematisch in Angriff genommen.

Anmerkung bei der Korrektur: Inzwischen gelang es, mit einer anderen Waage bei 1 kg Belastung mit gleichzeitiger Horizontalpendel- und Fernrohrvergrößerung bei 2.5 m Skalenabstand die erforderliche Empfindlichkeit von

etwa $0,001$ m φ pro 1 mm zu erreichen. Die Schwingungsdauer betrug 57 sec. Bei der Arretierung dieser Waage, insbesondere der Schalengehänge, traten wie allgemein auch hier bei einer Genauigkeit von 10^{-8} Schwierigkeiten auf, die daher rühren, daß die Schneiden nicht absolut scharf sind, sondern einen Krümmungsradius von etwa 1μ haben. Hierbei werden durch Abrollen auf der Schneide relativ sehr große Änderungen in der Hebellänge verursacht. Nach inzwischen ausgeführten Vorversuchen mit der in Fig. 2 abgebildeten Waage, bei der die Schalen jedoch an Bändern aufgehängt waren, können wohl auch diese Schwierigkeiten als beseitigt angesehen werden.

Jena, Reichsanstalt für Erdbebenforschung, Juni 1930.

Die wahre Kugelwelle

Von **Karl Uller**, Gießen — (Mit 5 Abbildungen)

1. Die Entwicklung des Wellenbegriffes. Ich habe in Gerlands Beiträgen zur Geophysik *) den Beweis liefern können, daß die bisherige mathematische Behandlung von allgemeineren Wellenaufgaben durchweg und notwendig mit Annahmen arbeiten muß, und daß diese einer Kritik nicht standhalten. Danach kann es keine Refraktion in stetig-inhomogenen Mitteln geben und kein Prinzip der schnellsten Ankunft zur Ermittlung der Wellenbahnen. Man kann nicht die allgemeine Ausbreitung so berechnen, daß man Partikularlösungen der vorgegebenen Feldgleichungen summiert. Man kann nicht im Sinne von Huygens jeden Punkt in einem erregten stetigen Mittel als Erregungszentrum von Elementarwellen ansehen. Man kann nicht geführte Wellen an der Grenze zweier Flüssigkeiten so darstellen, daß man ein stationäres, geschlängelt Geschwindigkeitsfeld ansetzt, die Grenzbedingungen erfüllt und dann das Gesamtfeld sich mit einer konstanten Geschwindigkeit parallel der ungestörten Grenzfläche bewegen läßt. Es gibt keine Schwingungen und keine Resonanz im bisherigen Sinne. Es gibt keine Longitudinalwellen und keine Biegungswellen in begrenzten elastischen Körpern, sondern nur Verdünnungsverdichtungswellen, Scherungswellen sowie ihre Koppelung bei den geführten Wellen. Verfehltheit und Unzulänglichkeit sind die Kennzeichen der bisherigen Rechenweisen, und was noch schlimmer ist: völlige Ratlosigkeit, wie Wellenaufgaben allgemein, streng und annahmenfrei anzufassen sind. Es gibt eben noch keine Wellentheorie.

Die Suche nach der Wellentheorie**) hat mit der Frage zu beginnen: was ist das, was wir als Welle direkt sehen oder indirekt wahrnehmen? Es ist die Fortpflanzung räumlich stetig verteilter, geordneter Zustände in irgendwelchen

*) Gerlands Beitr. z. Geophys. **24**, 309—334 (1929).

) Gerlands Beitr. **26, 199—238 (1930).