

Werk

Jahr: 1932

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:8

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0008

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0008

LOG Id: LOG_0006

LOG Titel: Ein statischer Schweremesser

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 statischer Schweremesser

(Zweite Mitteilung)

Von **H. Haalek**, Potsdam — (Mit 5 Abbildungen)

In einer vorläufigen Mitteilung*) konnte ich zeigen, daß die Frage der Entwicklung eines auf dem barometrischen Prinzip beruhenden statischen Schweremessers praktisch einer Lösung sehr nahe gebracht worden ist, so daß mit guter Aussicht auf Erfolg Versuche unternommen werden konnten, das Problem einer vollständigen Lösung zuzuführen. Von Seiten der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft wurden mir in dankenswerter Weise die erforderlichen Mittel zur Verfügung gestellt, mit Hilfe deren ein verbessertes Instrument gebaut und praktische Messungen im Gelände ausgeführt werden konnten. Über die bisher gewonnenen Versuchsergebnisse möchte ich im folgenden ausführlicher berichten. — Inhalt: 1. Die möglichen Grundprinzipien für die Konstruktion von Schweremessern. 2. Theorie des barometrischen Prinzips. 3. Methoden zur Erreichung der erforderlichen Empfindlichkeit. 4. Die Ablesevorrichtung. 5. Die Anordnung der Libellen und Fußschrauben. 6. Die Wirkung von Temperaturänderungen auf die Ablesungen. 7. Die Eliminierung des Temperatureinflusses.

Das Bestreben, das umständliche und auch recht kostspielige Verfahren der Pendelmessungen durch ein rationelleres Verfahren zu ersetzen, ist schon sehr alt, und in der einschlägigen Literatur findet man zahlreiche Versuche und auch Vorschläge von eventuellen Konstruktionsmöglichkeiten angegeben. Ursprünglich wurden Schwerkraftsmessungen aus rein geodätischem Interesse ausgeführt; später verfolgten sie in erster Linie geophysikalische Ziele. In den letzten Jahren, besonders seitdem ihre Bedeutung für die mehr geologisch-geophysikalischen Probleme und besonders für die Aufgaben des praktischen Bergbaues offenbar wurden, hat ihr wirtschaftlicher Wert immer mehr zugenommen. Dadurch rückte auch das Problem der Entwicklung eines Schweremessers, mit welchem man in schneller und einfacher Weise eine Messungsreihe mit der nötigen Genauigkeit ausführen kann, wieder in den Mittelpunkt des Interesses, wie die zahlreichen Versuche, welche in den letzten Jahren von den verschiedensten Seiten angestellt worden sind, zeigen.

1. Die möglichen Grundprinzipien für die Konstruktion von Schweremessern. Überblicken wir die Grundprinzipien, nach welchen überhaupt die Entwicklung eines Schweremessers möglich sein kann, so lassen sich etwa folgende anführen**):

1. Dynamische Methoden (das ist die Messung der Änderung der Schwerkraft mit Hilfe der Geschwindigkeit, mit welcher ein Körper seine Lage unter dem Einfluß der Schwerkraft ändert):

*) Zeitschr. f. Geophys., Jahrg. 7 (1931), Heft 1/2.

***) Die folgende Einteilung ist nicht ganz streng.

- a) Messung der Fallgeschwindigkeit eines Körpers;
- b) Messung der Periode eines unter dem Einfluß der Schwere hin und her schwingenden Körpers;
- c) Messung der Ausflußgeschwindigkeit einer Flüssigkeitsmenge durch eine enge Öffnung.

2. Statische Methoden (das ist Messung der Änderung der Schwerkraft mit Hilfe der Änderung der Gleichgewichtslage eines Körpers, dessen Schwere mit Hilfe einer elastischen Kraft das Gleichgewicht gehalten wird):

- a) Erzeugung der elastischen Gegenkraft mit Hilfe elastischer Federn;
- b) Benutzung des atmosphärischen Luftdruckes als elastische Gegenkraft;
- c) Erzeugung der elastischen Gegenkraft mit Hilfe einer abgeschlossenen Gasmasse.

Ein anderer Vorschlag läuft noch darauf hinaus, durch feine optische Messungen die verschieden starke Krümmung zu beobachten, welche ein auf einer Platte liegendes Quecksilberkügelchen unter dem Einfluß der Schwerkraft erfährt, eine rein theoretische Möglichkeit, der wohl keine praktische Bedeutung beigemessen werden kann.

Auf Grund dieser Prinzipien kann man Schweremesser in der mannigfachsten technischen Ausführung konstruieren und es sind auch viele sehr verschiedenartige praktische Versuche bekanntgeworden.

Von den dynamischen Methoden sind die Versuche, mit Hilfe von Messungen der Fallgeschwindigkeiten von Körpern — die Atwoodsche Fallmaschine beruht z. B. auf diesem Prinzip — oder von Messungen der Ausflußgeschwindigkeit einer Flüssigkeitsmenge durch eine enge Öffnung die erforderliche Genauigkeit zu erhalten, ziemlich aussichtslos. Dagegen bilden die zu höchster Feinheit ausgebildeten Pendelmessungen bis jetzt die einzige praktisch gebräuchliche Messungsmethode. Ihre Genauigkeit beträgt bei Messungen auf dem festen Lande etwa ± 1 Milligal (= $\frac{1}{1000}$ cgs-Einheit). Für die Aufgaben der höheren Geodäsie, den geophysikalischen Problemen (Isostasie usw.), der Erforschung verdeckter größerer geologischer Formationen ist diese Genauigkeit vollkommen ausreichend; wenn es sich um die Betrachtung von Teilen der Erdoberfläche von kontinentalem Ausmaße handelt, genügt auch schon eine geringere Genauigkeit. Dagegen ist es für viele Aufgaben der praktischen Geologie und der Lagerstättenforschung erstrebenswert, die Meßgenauigkeit noch bis auf $\frac{1}{10}$ Milligal zu steigern. Demnach kann man also das Problem des statischen Schweremessers erst dann als vollkommen gelöst bezeichnen, wenn ein solches Instrument Schwereunterschiede mit einer Genauigkeit und Sicherheit von etwa ± 1 Milligal zu messen gestattet.

Die neueren Versuche, die Schnelligkeit und Genauigkeit der Pendelmessungen im Gelände zu erhöhen, beruhen hauptsächlich auf der Einführung der Referenzpendelmethode, indem man die Koinzidenzen der an einem festen Stationspunkt und der an den jeweiligen Geländepunkten schwingenden Pendel mit Hilfe drahtloser Übertragung photographisch registriert.

Zu den dynamischen Methoden muß man die neueren Versuche von Holweck und Lejay*) rechnen, welche eine Quarzmasse, die an einer Invarfeder befestigt ist, in vertikaler Richtung schwingen lassen, wobei die Schwingungen selbst photographisch registriert werden. Die Versuche mit diesem „elastischen Pendel“ sind noch im Gang.

Von den Instrumenten, welche auf einem statischen Prinzip beruhen, ist in erster Linie aus der ersten Gruppe (das ist der Erzeugung der elastischen Gegenkraft mittels elastischer Federn) das Schmidtsche Trifilargravimeter zu erwähnen, mit welchem Schweydar**) bei Stationsbeobachtungen eine Genauigkeit bis zu 10^{-5} cgs-Einheiten erzielte. Es würde sich also, um daraus einen praktisch im Gelände brauchbaren statischen Schweremesser zu machen, nur darum handeln, dieses Instrument transportsicher und unabhängig von Luftdrucks-, Luftfeuchtigkeits-, Temperatureinflüssen zu machen, wobei die Meßsicherheit noch bis auf 10^{-3} cgs verringert werden kann. Es sind auch in den letzten Jahren von verschiedenen Seiten Versuche in dieser Richtung gemacht worden, und es ist meines Erachtens nicht ausgeschlossen, daß man auf diesem Wege noch mal zum Ziele gelangen wird.

Hierher gehören auch die Versuche von R. Threlfall und J. Pollock***), bei welchen dem Gewicht einer Masse die Torsionskraft eines horizontal gespannten Drahtes entgegenwirkte. Im Laufe des letzten Jahrzehnts gelang es Ising und Urelius†), auf Grund dieses Prinzips einen statischen Schweremesser zu entwickeln, der an Meßgenauigkeit den Pendelmessungen schon ziemlich nahe kommt: Eine Quarzmasse ist an einer vertikal stehenden Quarzfeder befestigt. Neigt man das ganze Instrument um einen bestimmten Winkel, so neigt sich die Feder, welche die Quarzmasse trägt, infolge der Schwerkraft um einen anderen meßbaren Winkel. Aus dem Verhältnis dieser beiden Winkel kann man die Größe der Astasierung bestimmen und aus deren Änderung die Änderung der Schwerkraft ermitteln. Nach den bisherigen, allerdings noch nicht sehr zahlreichen, praktischen Messungen liegt die Meßsicherheit innerhalb der Grenze von ± 10 Milligal.

Wesentlich geringere Aussicht auf Erreichung der nötigen Meßgenauigkeit besitzt die Methode, eine Masse an einer elastischen Feder aufzuhängen und die Änderung der Schwerkraft durch Änderung der Dehnung der Feder zu messen. Hierher gehört z. B. die Elliotsche Waage, mit der in Australien gemessen worden sein soll, und das „Bathometer von W. Siemens 1876††). Letzterer benutzte

*) F. Holweck und P. Lejay: Un instrument transportable pour la mesure rapide de la Gravité. *Comp. rend.* **190**, 1387 (1930); **192**, 1116 (1931).

) W. Schweydar: Beobachtung der Änderung der Intensität der Schwerkraft durch den Mond. *Sitzber. d. Preuß. Akad. d. Wiss., math.-phys. Kl.*, **14, 454—465. Berlin 1914.

***) R. Threlfall und J. Pollock: *Phil. Trans.* **193** (A), 215 (1900).

†) G. Ising und N. Urelius: Die Verwendung astasierter Pendel für relative Schweremessungen. *Handlingar Stockholm* (3) **6**, Nr. 4 (1928); (3) **9**, Nr. 9 (1931).

††) W. Siemens: *Der Bathometer*. Berlin, Verlag J. Springer, 1878.

ein mit Quecksilber gefülltes Stahlrohr, das sich unten zu einem Gefäß erweitert und durch eine Stahlplatte geschlossen ist, welche durch zwei Stahlfedern gehalten wird. Die Gewichtsänderung der Quecksilbermasse bewirkt eine Dehnung der Stahlfedern, welche durch die Verschiebung der Quecksilberoberfläche abgelesen werden kann.

Die zweite Gruppe der statischen Methoden, bei welchen der atmosphärische Luftdruck als elastischer Gegendruck gegen das Gewicht einer Quecksilbersäule dient, bezeichnet man wohl auch als hypsometrische Methode. Ändert sich die Schwerkraft, so ändert sich das Gewicht der Quecksilbersäule; man muß also, um dann diese Änderung mit Hilfe des Luftdruckes bestimmen zu können, den Luftdruck auf eine Weise ermitteln, die nicht wie das Quecksilberbarometer von der Schwerkraft selbst abhängt. Das ist möglich mit Hilfe eines Aneroids oder mit Hilfe der Bestimmung der Siedetemperatur des Wassers, von denen das erstere

als zu ungenau ausscheidet. Dieses Verfahren wurde zuerst von Mohn*) benutzt für Messungen auf dem Lande, um die Schwerekorrektur des Barometers für den meteorologischen Gebrauch zu ermitteln, dann von Hecker**) für Messungen auf See ausgebildet und praktisch auf einigen Seereisen ausgeführt; als erreichbare Genauigkeit wird unter genügend günstigen Bedingungen etwa ± 20 Milligal angegeben.

Das Prinzip der letzten Gruppe der statischen Methoden, bei welchen der Druck einer abgeschlossenen Gasmasse die elastische Gegenkraft gegen die Schwere einer Quecksilbersäule bildet, kann man auch als barometrisches Prinzip***) bezeichnen. Da auf diesem der von mir entwickelte statische Schweremesser beruht, muß dieses Prinzip etwas eingehender erörtert werden.

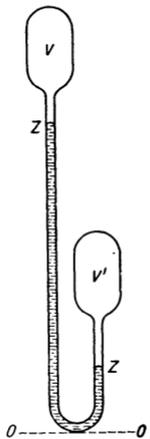


Fig. 1.
Barometrisches
Prinzip

2. Theorie des barometrischen Prinzips. Zwei nach

außen hin luftdicht abgeschlossene Gefäße (s. Fig. 1) stehen durch ein U-Rohr miteinander in Verbindung, welches zum Teil mit Quecksilber gefüllt ist. Der Gasdruck in den beiden Gefäßen ist ungleich, so daß das Quecksilber in dem einen Schenkel höher steht als in dem anderen. Bedeutet:

- v = oberes Gasvolumen,
- v' = unteres Gasvolumen,

*) M. Mohn: Das Hypsometer als Luftdruckmesser und seine Anwendung zur Bestimmung der Schwerekorrektur, S. 69, Christiania 1899; Zeitschr. f. Instrkde. **19**, 342 (1899).

**) O. Hecker: Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean. Veröff. d. Preuß. Geodät. Inst., Neue Folge Nr. 11. Berlin 1903.

***) Strenggenommen kann man auch die hypsometrische Methode als auf dem barometrischen Prinzip beruhend bezeichnen.

p = Gasdruck im Volumen v ,

p' = Gasdruck im Volumen v' ,

z = vertikaler Abstand des oberen Quecksilberspiegels von einem beliebigen Fixpunkt Null,

z' = vertikaler Abstand des unteren Quecksilberspiegels von dem Fixpunkt Null,

σ = Dichte des Quecksilbers,

g = Schwerebeschleunigung,

so ist der Druckunterschied:

$$p' - p = (z - z') \sigma g \dots \dots \dots (1)$$

Ändert sich nun die Schwerkraft um den kleinen Betrag dg , so ändern sich auch die Abstände der Quecksilberoberfläche und die Gasdrucke nach folgender Beziehung:

$$dp' - dp = \sigma g (dz - dz') + (z - z') \sigma dg \dots \dots \dots (2)$$

Nach dem Gasgesetz ist:

$$dp' = - \frac{p'}{v} dv',$$

$$dp = - \frac{p}{v} dv.$$

Für dv und dv' können wir setzen:

$$dv' = - F \cdot dz',$$

$$dv = - F dz,$$

wobei F den Querschnitt des U-Rohres bedeutet.

Eingesetzt in Gleichung (2) ergibt sich für die Schwereänderung:

$$dg = \frac{g}{p' - p} \left\{ dz \left(F \frac{p}{v} + \sigma g \right) - dz' \left(F \frac{p'}{v'} + \sigma g \right) \right\} \dots \dots \dots (3)$$

Das ist die Grundgleichung für einen auf dem barometrischen Prinzip beruhenden statischen Schweremesser.

Prinzip und Theorie eines solchen Instrumentes sind also denkbar einfach; um so größer sind aber die Schwierigkeiten, welche bei der technischen Ausführung zu überwinden sind. Bevor eine solche in Angriff genommen wird, ist zunächst theoretisch zu untersuchen, welche Faktoren bei der Konstruktion besonders zu berücksichtigen sind, damit

1. die erforderliche Empfindlichkeit erreicht wird,
2. die unvermeidlichen Fehlerquellen auf ein solches Maß herabgemindert werden, daß die Messungsergebnisse auch die erforderliche Sicherheit besitzen, und
3. die Arretierungs- und Transporteinrichtungen usw. so ausgebildet werden, daß sie weder die Messungsergebnisse in erheblichem Maße beeinflussen noch die Handhabung des Instrumentes zu sehr erschweren.

3. Methoden zur Erreichung der nötigen Empfindlichkeit. Zunächst handelt es sich um die Erreichung der nötigen Ablesegenauigkeit. Setzt man die numerischen Werte in die Gleichung (3) ein, so findet man, daß, um ein Milligal Schwereänderung noch beobachten zu können, der Abstand der beiden Quecksilberoberflächen bis auf ein Millionstel seiner Länge noch sicher gemessen werden muß. Es lassen sich dafür eine ganze Reihe von Konstruktionsmöglichkeiten anführen:

Bei dem von mir entwickelten statischen Schweremesser erzielte ich — um es gleich vorweg zu nehmen — die erforderliche Empfindlichkeit nach einer Methode, mit welcher bereits Huyghens Versuche beim Barometer anstellte und welche seitdem öfter versucht worden ist: das Quecksilber enthaltende Rohr ist an beiden Enden gefäßartig erweitert, um eine möglichst große Oberfläche F des Quecksilbers zu erhalten. Über dem Quecksilberspiegel befindet sich an beiden Enden (s. Fig. 2) eine leichte Flüssigkeit, welche jede bis in eine Kapillare mit engem Querschnitt q reicht. Eine Höhenänderung dz des Quecksilberspiegels hat dann eine entsprechend dem Verhältnis der Oberflächen vergrößerte Verschiebung des Flüssigkeitsmeniskus um $dz \cdot F/q$ zur Folge.

Bei einem statischen Schweremesser wurde eine solche Vergrößerungsmethode zuerst versucht von W. Siemens 1859; er benutzte als Flüssigkeiten Alkohol und Wacholderöl übereinander*).

Die Methoden, welche darauf beruhen, durch Erweiterung der Quecksilberoberfläche die erforderliche Vergrößerung zu erzielen, lassen sich in verschiedener Weise ausbilden. Z. B. besteht eine Möglichkeit darin, daß das über der erweiterten Quecksilberoberfläche befindliche Rohr horizontal gerichtet und zu einer Kapillaren mit engem Querschnitt verengt wird, in welcher sich ein leicht beweglicher Flüssigkeitstropfen befindet. Eine Höhenänderung des Quecksilberspiegels hat dann eine entsprechend dem Verhältnis der Oberflächen vergrößerte Verschiebung des Flüssigkeitstropfens zur Folge, die beobachtet werden kann.

Madsen**) bildete bei seinen Versuchen die Ablesevorrichtung in der Weise aus, daß die obere Quecksilberoberfläche recht groß gemacht wurde, am unteren Ende jedoch ein horizontales enges Rohr zum Gasraum führte, in welches das

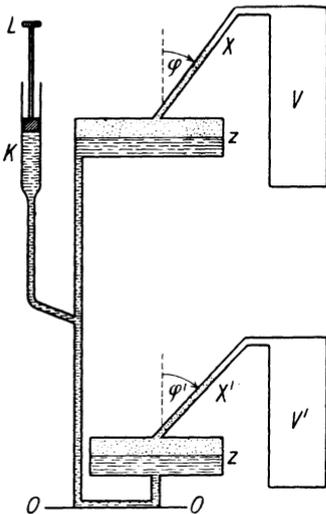


Fig. 2.
Messungs- und Verstellvorrichtung

*) Das eigentliche „Bathometer“, mit welchem W. Siemens später (1875) Versuche anstellte, beruht nicht auf dem barometrischen Prinzip (vgl. S. 19).

**) V. H. O. Madsen: Statischer Schweremessapparat. Verh. Intern. Erdmess. zu Hamburg 1912, Beilage A. VI, S. 245.

Quecksilber hineinragt. Eine Höhenänderung der Quecksilbersäule hat dann auch eine entsprechend dem Verhältnis der Oberflächen vergrößerte Verschiebung des Quecksilbers im unteren engen Rohre zur Folge. Die Messungen selbst führte Madsen in der Weise aus, daß das Instrument soweit geneigt wurde, bis das Quecksilber auf eine bestimmte Marke einstellte. Die Größe des Neigungswinkels gibt dann ein Maß für die Größe der Schwereänderung.

Sterneck*) bildete das sogenannte „Barymeter“, mit welchem er gegen Ende des vorigen Jahrhunderts Versuche anstellte, in der Weise aus, daß beide Quecksilbergefaße recht groß gemacht wurden, das Verbindungsrohr aber schräg unter einem Winkel von etwa 40° gegen die Horizontale angeordnet wurde. Die ganze Vorrichtung balancierte in Form einer Waage auf einer Schneide. Ändert sich die Schwerkraft, damit also die Höhe der Quecksilbersäule, so fließt eine Quecksilbermenge von dem einen Gefäß in das andere. Die Waage ändert infolgedessen ihre Neigung, und die Größe des Neigungswinkels bzw. die zusätzliche Kraft, um die Waage wieder auf die ursprüngliche Gleichgewichtslage zu bringen, geben das Maß für die Größe der Schwerkraftsänderung. Mit dieser Waageeinrichtung ließ sich eine beträchtliche Empfindlichkeit erzielen.

Andere Möglichkeiten, die nötige Ablesegenauigkeit zu erreichen, sind z. B., wie bei Gefäßbarometern mit Hilfe einer fein verstellbaren Platinspitze, welche im Moment des Berührens der Quecksilberoberfläche einen Stromschluß bewirkt**), oder mit Hilfe einer in vertikaler Richtung fein verstellbaren Metallplatte über dem Quecksilberspiegel, indem man die Änderung der Wellenlänge mißt, welche durch die Abstandsänderung des in einem Schwingungskreis befindlichen Kondensators (Metallplatte—Quecksilberspiegel) verursacht wird. Direkte optische Methoden, z. B. mit Hilfe eines besonderen Ablesemikroskops, wie es z. B. von Mascart***) versucht wurde, oder mit Hilfe photographischer Registrierung, wie es von Pontremoli†) angewandt wurde, scheinen mir kaum mit der erforderlichen Genauigkeit ausführbar zu sein.

Von den angeführten Möglichkeiten, wie die Änderung der Länge der Quecksilbersäule beobachtbar gemacht werden kann, lassen sich wohl die meisten mit der nötigen Empfindlichkeit technisch ausführen. Sie sind aber teils mit zu großen Fehlerquellen behaftet, teils in der Herstellung oder für die Ausführung der Messungen zu umständlich. Der Grund, warum ich der zuerst angeführten Methode den Vorzug gab, besteht darin, daß sie nicht nur außerordentlich einfach ist, was ihre instrumentelle Einrichtung anbelangt, sondern daß auch bei den Messungen im Gelände keinerlei Manipulationen nötig sind, da die Ablesung ohne weiteres erfolgen kann, was eine ganz außerordentliche Beschleunigung des Meßvorganges bedeutet.

*) R. v. Sterneck: Mitt. d. militär-geogr. Instituts, Wien 1885, Bd. V, S. 102 ff.; Wien 1894, Bd. XIV, S. 308 ff.

) Z. B. bei G. Duffield: Apparatus for the Determination of Gravity at Sea. Proc. Roy. Soc. London (A) **92, 505 ff. (1916).

***) M. Mascart: Compt. rend. **95**, 126 (Paris 1882); **95**, 631 (Paris 1882).

†) Einige Instrumente für die Polfahrt Nobiles im Jahre 1928, Petermanns Mitt., Ergänzungsheft Nr. 205, Gotha 1929, S. 89 ff.

4. Die Ablesevorrichtung. Fig. 3 zeigt die sichtbare Ablesevorrichtung: die obere Kapillare stellt die x -Kapillare (Ablesung in der Figur $x = 0.7$), die untere die x' -Kapillare (Ablesung $x' = 1.95$) dar. Damit bei Neigungen oder bei den Erschütterungen des Transports die Flüssigkeit nicht in die Räume v bzw. v' überfließt, ist das von den Kapillaren nach den Voluminas v bzw. v' führende Verbindungsrohr erweitert und vertikal über den Kapillaren angeordnet, so daß die Flüssigkeit, wenn sie bis in dieses Vertikalrohr steigt, immer wieder vollständig in die Kapillare zurückfließt.

Die wesentlichste Verbesserung, welche ich mit dieser Ablesungsmethode gegenüber früheren ähnlichen Anwendungen beim Barometer erzielte, besteht darin, daß es mir gelang, sie praktisch fast vollständig von fehlerhaften Einflüssen zu befreien. Erreicht wurde es dadurch, daß die Ablesung symmetrisch angebracht wurde, sowohl über dem oberen als auch über dem unteren Quecksilberspiegel. Dadurch ergibt sich nämlich die Möglichkeit, eine Verstellvorrichtung folgender Art anzubringen (s. Fig. 2).

Das Quecksilberrohr ist mit einem seitlichen, ebenfalls mit Quecksilber gefüllten Volumen verbunden, welches mit Hilfe eines Kolbens verändert werden

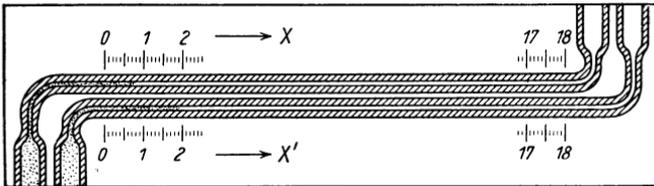


Fig. 3. Sichtbare Ablesevorrichtung

kann. Zieht man den Kolben K mittels der Schraube L zurück, so werden beide Flüssigkeitsmenisken nahezu gleichmäßig zurückgezogen. Haben sich beim Transport in den Kapillaren Blasen gebildet, so kann man diese mit Hilfe der Verstellvorrichtung in folgender Weise beseitigen: Man schraubt den Kolben K soweit hinein, bis die Flüssigkeiten in den beiden oberen Vertikalrohren so weit gestiegen sind, daß die Blasen verschwunden sind. Dann zieht man den Kolben K sehr langsam wieder zurück, bis beide Flüssigkeitsmenisken wieder in den Kapillaren stehen, und zwar möglichst so, daß sie rechts und links gleich weit von der Skalenmitte entfernt stehen, die Summe ihrer Ablesung also stets denselben Wert ergibt. Auf die Messungen hat eine solche Verschiebung der Flüssigkeitsmenisken keinen Einfluß, da es nur auf ihre Stellung relativ zueinander ankommt.

Als Fehlerquellen, welche der Ablesevorrichtung noch anhaften können, kommen im wesentlichen in Frage:

1. Das ungleichmäßige Haften der Flüssigkeit an den Rohrwandungen beim Zurückziehen des Kolbens K . Bleibt z. B. in der einen Kapillaren 1 mm mehr an den Wänden haften als in der anderen, so bedeutet das bei dem

jetzigen Instrument einen fehlerhaften Einfluß von etwa einem Milligal bei der Messung. Man kann solche Fehler praktisch dadurch sehr herabmindern, daß man den Kolben *K* mehrmals hineinschraubt und wieder langsam zurückzieht, wodurch sich die Fehler im Mittel ziemlich ausgleichen müssen. Einen wesentlichen Einfluß auf die Messungen kann diese Fehlerquelle daher nicht haben.

2. Ungleichmäßige Neigung der Meßkapillaren gegen die Horizontalrichtung. Sind die Kapillaren nicht mehr horizontal gerichtet, so spielt nämlich der Einfluß des Gewichtes der Flüssigkeitssäule eine Rolle. Bedeutet φ den Neigungswinkel der oberen Meßkapillaren, φ' denjenigen der unteren Kapillaren gegen die Vertikalrichtung, so sind, wenn die Flüssigkeitsmenisken sich um dx bzw. dx' verschieben, die entsprechenden Druckänderungen der Flüssigkeitssäulen: $dx \cdot \cos \varphi \cdot \sigma'g$ bzw. $dx' \cdot \cos \varphi' \sigma'g$, wo σ' die Dichte der Flüssigkeitssäule bedeutet; und zwar bedeutet es eine Vergrößerung des Druckes p um den Betrag $dx \cos \varphi \cdot \sigma'g$ und des Druckes p' um den Betrag $dx' \cos \varphi' \sigma'g$. Diese Tatsache ist insofern von großer Wichtigkeit, als sie die Möglichkeit gibt, die Empfindlichkeit der Ablesung, d. h. den Skalenwert, je nach der Neigung der Meßkapillaren zu variieren. Wird beim Bau des Instrumentes konstruktiv genügende Sorgfalt dafür getroffen, daß die Neigung der Meßkapillaren relativ zu den Libellen bei den Messungen unveränderlich bleibt, so ist ein fehlerhafter Einfluß kaum zu befürchten.

5. Die Anordnung der Libellen und Fußschrauben. Da die Ablesungen von der Neigung des Apparates abhängen, so daß die Skalenwertsbestimmungen experimentell durch Neigung des Instruments mit Hilfe der Fußschrauben aus der Vertikalen heraus ausgeführt werden können, außerdem die Skalenwerte von der Neigung der Ablesekapillaren abhängen, so ist die Anordnung der Fußschrauben, Libellen und Ablesekapillaren sehr wichtig. Fig. 4 zeigt ihre Stellung relativ zueinander:

1. Eine Umdrehung der Fußschraube *I* (d. h. senkrecht zur Richtung der Ablesekapillaren) bedeutet $2a/l\sqrt{3}$ (in Bogenmaß) Neigung des Apparates (Libelle 2 bleibt unverändert).

2. Eine Umdrehung der Fußschraube *II* bzw. *III* (d. h. in Richtung der Ablesekapillaren) bedeutet a/l Neigung des Apparates (Libelle 1 muß dabei unverändert gehalten werden).

Dabei bedeutet a die Ganghöhe der Fußschrauben, l ihren gegenseitigen Abstand

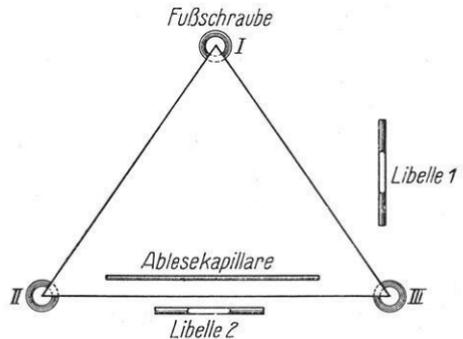


Fig. 4.
Anordnung der Libellen,
Fußschrauben und Ablesekapillaren

Für $l = 60$ cm, $a = 0.075$ cm folgt:

$$\frac{2a}{l} = 0.001\ 443\ 3 = 4' 57'',$$

$$\frac{a}{l} = 0.001\ 25 = 4' 16''.$$

Libelle 1 justiert man zunächst mit Hilfe der Fußschraube I: Bedeutet von einer beliebigen Ausgangsstellung aus R_1 die Anzahl der Umdrehungen der Schraube I bei Hebung des Apparates, R_2 diejenige bei Senkung des Apparates, wobei R_1 und R_2 so gewählt werden, daß die Stellung der Menisken x' und x in beiden Fällen dieselben sind, so muß die Libelle bei der Stellung $\frac{R_1 - R_2}{2}$ auf Null gestellt werden, d. h. in diesem Falle steht das Instrument senkrecht.

Die Libelle 2 justiert man dann auf eine solche Nullage, daß der Skalenwert den gewünschten Wert erhält (vgl. S. 25).

6. Die Wirkung von Temperaturänderungen auf die Ablesungen. Die schwierigste Frage, welche bei der Entwicklung eines statischen Schweremessers überhaupt und im besonderen eines Schweremessers nach dem barometrischen Prinzip zu lösen ist, bildet die Aufgabe, den Einfluß von Temperaturänderungen genügend sicher zu eliminieren bzw. in Rechnung zu stellen. Der Einfluß der Temperatur ist außerordentlich groß; mit der Temperatur ändert sich:

1. Der Druck der eingeschlossenen Gasmassen:

$$\frac{dp'}{dt} = + \alpha p'.$$

$$\frac{dp}{dt} = + \alpha p.$$

wo α den Ausdehnungskoeffizienten der Gase bedeutet.

2. Die Dichte σ des Quecksilbers:

$$\frac{d\sigma}{dt} = - \sigma \gamma,$$

wo γ den Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers bedeutet.

3. Die Voluminas v und v' :

$$\frac{dv}{dt} = 3ev,$$

$$\frac{dv'}{dt} = 3e'v',$$

wo e bzw e' die linearen Ausdehnungskoeffizienten des Materials der Wandungen bedeuten.

Damit folgt aus Gleichung (1) und (2) ohne Schwierigkeit, daß eine Temperaturänderung um $t^{\circ}\text{C}$ eine Höhenänderung der Quecksilbersäule bewirkt, welcher eine Schwereänderung von der Größe

$$g\left(\alpha + \gamma - 3 \frac{p'e' - pe}{p' - p}\right)t$$

entspricht*); das sind, wenn man die numerischen Werte einsetzt, fast 4000 Milligal pro Grad Celsius! Um ein Milligal Schwereänderung noch sicher messen zu können, ist es also nicht nur nötig, die Temperatur für den ganzen Apparat bis auf $1/4000$ Grad gleichmäßig zu halten, sondern sie auch mit einer solchen Genauigkeit zu messen oder ihren Einfluß mit einer solchen Präzision zu kompensieren. Diese Tatsache könnte auf den ersten Blick wohl als ein Beweis für die Unlösbarkeit des Problems angesehen werden, da eine derartige thermische Präzision bei einem größeren, im Gelände arbeitenden Apparat, der allen täglichen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist, in der Technik nicht bekannt ist.

7. Die Eliminierung des Temperatureinflusses. Es hat naturgemäß nicht an Versuchen gefehlt, dieser wärmetechnischen Aufgabe praktisch Herr zu werden. Bei fast allen Versuchen mit statischen Schweremessern hat man die Temperaturfrage durch Konstanthaltung der Temperatur zu lösen versucht dadurch, daß man den Apparat von einer Schicht schmelzenden Eises umgab und so dauernd auf Null Grad hielt. Madsen und Sterneck haben den Versuch gemacht, den Einfluß der Temperatur zu kompensieren. Beide Forscher benutzten dazu die Ausdehnung einer bestimmten Menge Alkohols. Bei dem Apparat von Madsen wird der obere Quecksilberspiegel von einer solchen Flüssigkeitsmenge überdeckt, daß bei zunehmender Wärme infolge der Ausdehnung des Alkohols der Druck p im oberen Gefäß v genau so stark zunimmt wie der Druck p' im unteren Gasvolumen v' . Sterneck brachte bei seinem Apparat einen besonderen Temperaturkompensator an: Ein mit Quecksilber gefülltes diagonal gerichtetes Glasrohr mit zwei Gefäßen wurde so am Waagesystem angebracht, daß es kreuzweise zu dem Rohr des Meßapparates stand. Das untere Volumen des Kompensators war aber statt mit einem Gas mit einer solchen Alkoholmenge gefüllt, daß bei Temperaturzunahme infolge der Ausdehnung des Alkohols gerade eine solche Quecksilbermenge auf die andere Seite des Waagebalkens gedrückt wurde, daß die Gleichgewichtslage des gesamten Waagesystems von Temperaturänderungen möglichst wenig beeinflusst wurde.

Wegen der fundamentalen Bedeutung, welche der Frage des Temperatureinflusses bei der Konstruktion eines statischen Schweremessers zukommt, ist es nötig, alle sich bietenden Möglichkeiten, den Temperatureinfluß herabzumindern, zu prüfen und weitgehendst auszunutzen. Zunächst habe ich daher eine sorg-

*) Die Formel ändert sich noch etwas, wenn man die Temperatureinflüsse, welche aus der Art der Ablesevorrichtung stammen, mitberücksichtigt (vgl. S. 28, Anmerkung).

fältige Temperaturkompensation ausgebildet in folgender Weise: Die Räume v und v' wurden recht groß gemacht und in möglichst viele Einzelräume unterteilt (s. Fig. 5); die Teilräume wurden einzeln ineinander geschachtelt und die Dimensionen und das Material der Wandungen so gewählt, daß der Einfluß der Temperaturänderung auf die Ablesungen möglichst klein bleibt; d. h. es muß

$$\alpha + \gamma - 3 \frac{p'e' - pe}{p' - p} = 0$$

gemacht werden. Das kann man nur dadurch erreichen, daß $p'e'$ recht groß und pe dagegen negativ gemacht wird. Bei den ersten Versuchen wählte ich daher folgende Anordnung (s. Fig. 5): Je drei oben und unten abgeschlossene ineinander geschachtelte Rohre, von denen das innere und das äußere aus einem Material von großem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (z. B. Aluminium oder auch Kupfer, Messing), das mittlere aus einem Material von kleinem Ausdehnungs-

koeffizienten (z. B. Invar, Quarz, Porzellan oder dergleichen) besteht, bilden die Wandungen der Teilvolumina v und v' derart, daß der innere Zwischenraum das Volumen v , der äußere das Volumen v' bildet. Man kann nun entsprechend dem Material und den Drucken die Dimensionen so wählen, daß bei steigender Temperatur das Volumen v sich um so viel verkleinert, das Volumen v' sich vergrößert, sodaß der Druckunterschied $p' - p$ unverändert bleibt. (Die umgekehrte Anordnung der Räume ist naturgemäß ebensogut möglich.) Wegen der technischen

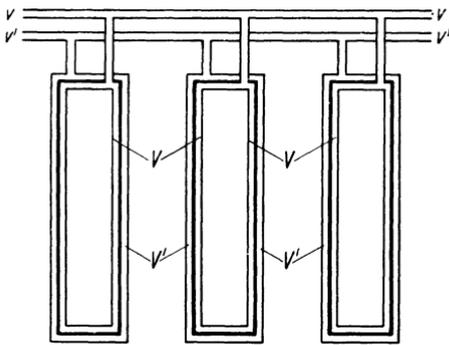


Fig. 5. Temperaturkompensation

Schwierigkeiten für die sicheren Abdichtungen, welche eine solche Durchführung der Temperaturkompensation sehr erschweren, ging ich bei den späteren Versuchen dazu über, keine Rohre mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten zu benutzen, sondern das Volumen v teilweise mit einer Flüssigkeit von großem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (z. B. Toluol, Petroleum oder dergleichen) zu füllen*). Die Temperaturkompensation wird bei jedem einzelnen ineinander geschachtelten Teilraumpaar für sich durchgeführt. Das hat folgende Vorteile: Da die kleinen

*) Die genaue Bedingung für die vollständige Temperaturkompensation lautet in diesem Falle:

$$(p' - p) \left(\alpha + \frac{\gamma \sigma - \gamma' \sigma'}{\sigma - \sigma'} \right) - 3 p' \cdot e_4 + p \left[3 e_3 - \frac{v_4}{v} (\gamma_1 - 3 e_2) \right] - (\sigma - \sigma') (3 e_5 - \gamma') \left(\frac{v_1}{F} - \frac{v'_1}{F'} \right) = 0,$$

Teilräume in sich viel schneller und besser Temperaturngleichheit erreichen als ein einziger größerer Gasraum und außerdem ein Fehler nur prozentual zum Gesamtraum in die Messungen eingeht, so werden sich Temperaturungleichheiten nicht so störend bemerkbar machen. Da nur das Mittel aus der Wirkung sämtlicher Teilräume in die Messungen eingeht, wird sich eine um so größere Sicherheit der Temperaturkompensation ergeben, je größer die Zahl der Einzelräume ist.

Eine Temperaturkompensation allein kann aber, auch wenn sie mit der größten Präzision durchgeführt ist, noch nicht genügen, den fehlerhaften Temperatureinfluß vollständig zu beseitigen, da jede Temperaturänderung stets mit ungleichen Wärmeverteilungen im Apparat verbunden ist. Eine Konstanthaltung der Temperatur des Instruments muß daher als unbedingt notwendig erscheinen. Um die Konstanz der Temperatur für jede beliebige Temperatur durchführen zu können, machte ich zunächst Versuche mit Hilfe eines Temperaturreglers: Der Apparat stand in einem Gefäß, welches eine gut wärmeausgleichende Flüssigkeit (z. B. Toluol oder Petroleum) enthielt; das Ganze war umgeben mit einem Luftraum, in welchem die Luft mit Hilfe eines Temperaturreglers auf konstante Temperatur und mittels eines Ventilators in dauernder Zirkulation gehalten wurde. Diese Versuche stellte ich jedoch bald ein, da einmal die ganze Einrichtung ziemlich umständlich und kostspielig ist, vor allen Dingen aber in der Temperaturkonstanz doch nicht vollkommen zuverlässig ist, jedenfalls bei weitem nicht so zuverlässig wie schmelzendes Eis. Deswegen habe ich auch die Petroleumfüllung wieder aufgegeben und mich nur mit einer Eisfüllung begnügt. Um noch zu verhindern, daß irgendwo mal kleine Temperaturungleichheiten entstehen — was z. B. an den wärmeleitenden Stellen, wo Metallteile durch die Eisschicht gehen, durch ungleichmäßig schnelles Abschmelzen des Eises leicht möglich sein kann —, ist es vorteilhaft, daß die Flüssigkeit, welche den Apparat umgibt — also das zwischen den Eisstücken befindliche Wasser —, mit Hilfe einer Pumpvorrichtung dauernd in Zirkulation gehalten wird.

Nach dem Ergebnis meiner bisherigen Versuche ist es nicht absolut notwendig, die angegebenen Vorrichtungen zur Beseitigung des fehlerhaften Temperatureinflusses bis zur höchsten Präzision auszubilden. Anfangs benutzte ich eine Feinverstellung, um mittels Änderung von Druck und Volumen auf empirischem Wege die Temperaturkompensation auf die höchste Vollkommenheit zu bringen.

wobei bedeuten:

- γ_1 = Ausdehnungskoeffizient der für die Kompensation benutzten Flüssigkeit,
- v_4 = Volumen der für die Kompensation benutzten Flüssigkeit,
- v_1 = Flüssigkeitsvolumen über dem oberen Quecksilberspiegel,
- v'_1 = Flüssigkeitsvolumen über dem unteren Quecksilberspiegel,
- F = Größe des oberen Quecksilberspiegels,
- F' = Größe des unteren Quecksilberspiegels.
- e_2 = linearer Ausdehnungskoeffizient des Materials der Wandung von v_4 .
- e_3 = linearer Ausdehnungskoeffizient des Materials der Wandung von v_1 ,
- e_4 = linearer Ausdehnungskoeffizient des Materials der Wandung von v' ,
- e_5 = linearer Ausdehnungskoeffizient des Materials der Wandung von v_1 und v'_1 .

Doch habe ich eine derartige Präzision, auf welche ich zuerst den größten Wert legte, als belanglos für die Sicherheit der Messungen gefunden, sie daher wieder aufgegeben und mich mit einer angenäherten Kompensation des Temperatureinflusses begnügt. Die Vollkommenheit der Konstanthaltung der Temperatur bildet eben doch den ausschlaggebenden Faktor. Ebenso habe ich die Pumpvorrichtung als nicht durchaus erforderlich gefunden und deswegen wieder abgeschafft.

(Fortsetzung folgt.)

Beitrag zur Theorie und Praxis der Referenzpendel-Messungen unter Anwendung von Minimumpendeln

Von A. Berroth, Aachen — (Mit 1 Abbildung)

Es werden die theoretischen Grundlagen der Referenzpendelmessungen untersucht und ein Verfahren angegeben, wie man zu Minimumpendeln gelangen kann; zum Schluß ein Zahlenbeispiel.

§ 1. Das gewöhnliche Verfahren der relativen Pendelmessungen beruht bekanntlich auf der Elimination der Pendellänge, die somit überhaupt nicht gemessen zu werden braucht.

Daß man jedoch ein weiteres nur höchst ungenau und mit vielem Zeitaufwand festzustellendes Messungselement ebenfalls eliminieren kann, wird meines Erachtens nicht genügend beachtet. Ich meine hiermit die Elimination des Zeitmaßstabes des absoluten Maßsystems, in welchem nach dem alten Verfahren die Schwingungszeit der Pendel ausgedrückt werden muß, also in (Sternzeit- oder) mittleren Zeitsekunden.

Das Hilfsmittel, um diese zweite Elimination zu erreichen, ist eben das Referenzpendel (in praxi mehrere), welches als ortsfestes Pendel verwandt und stets mit beobachtet wird. Dadurch wird man zunächst vom absoluten Maßsystem unabhängig und es genügt die Angabe, wieviel Schwingungen die Pendel zwischen zwei an verschiedenen Orten gleichzeitig eintreffenden Signalen gemacht haben, an Stelle der bisher nötigen Angabe, wieviel sie in einer bestimmten absolut in Sekunden gemessenen Zeit gemacht haben.

Da gerade der absolute Zeitmaßstab nur mit höchst unbefriedigender Genauigkeit angebbar ist, die Referenzpendelmethode diesen Maßstab jedoch vermeidet, so ist es auch nicht verwunderlich, daß man mit der neuen Methode ungleich genauer und schneller messen kann.

Das Verfahren ist in neuerer Zeit erstmalig 1926 vom Verfasser mit Unterstützung der Exploration-Berlin, jetzt Hannover, im Salzgebiet von Celle—Wietze angewandt worden. Es wurde daselbst durch Beobachtungen auf neun Stationen ein etwa 15 km langes Schwereprofil ermittelt, das mit Bohrerergebnissen verglichen werden konnte (s. Zeitschr. f. Geophys., 3. Jahrgang, Heft 1).