SUB | NIEDERSÄCHSISCHE STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK GÖTTINGEN

Werk

Jahr: 1936
Kollektion: fid.geo
Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:12
Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Werk Id: PPN101433392X_0012
PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0012

LOG Id: LOG_0045
LOG Titel: Untersuchungen über die Genauigkeit von Pendelmessungen an fester Station (Reichsvermessung 1935, Basisstation Göttingen)
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 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

Naturgemäß ist eine solche Genauigkeit in der barometrischen Höhenmessung nur unter den bei der Methode der statischen Schwerkraftsmessungen ganz besonders günstigen Bedingungen möglich. Das Luftbarometer arbeitet für die beschriebene Aufgabe hinreichend genau und ist wegen seiner größeren Zuverlässigkeit (und Billigkeit) dem Aneroid gegenüber vorzuziehen. Die Geschwindigkeit der statischen Schweremessungen wird durch die barometrischen Höhenmessungen nicht beeinträchtigt: Das Luftbarometer hängt neben dem Schweremesser und braucht nur abgelesen zu werden. Arretierungen sind während der Messungen nicht nötig, Erschütterungen und große Neigungen des Instruments oder dergleichen unschädlich. Die mit ihm verbundenen Vorteile (man ist nicht mehr an bestimmte Punkte mit Höhenangabe gebunden, sondern kann die Meßpunkte ganz nach Belieben wählen, was z. B. besonders bei starkem Wind vorteilhaft ist) machen es zu einem unentbehrlichen Hilfsinstrument für die statischen Schweremessungen.

Untersuchungen über die Genauigkeit von Pendelmessungen an fester Station

(Reichsvermessung 1935, Basisstation Göttingen)

Von **Werner Patzke** — (Mit 19 Abbildungen)

In Teil I wird die erreichte Genauigkeit der Pendelmessungen an der Basisstation Göttingen 1935 festgestellt. Mit den verwendeten Zeitmessern läßt sich die Genauigkeit der Zeitangabe für die Meßzeit von September bis Dezember 1935 von $4 \cdot 10^{-7}$ bei 93% der Messungen erreichen; dem entspricht ein Fehler der Schweremessung von 0.8 mgal. Durch eine Steigerung der Beobachtungsgenauigkeit läßt sich dieser Fehler nicht heruntersetzen (§ 2). — In Teil II werden experimentelle Untersuchungen mitgeteilt, die über die Ursachen der Pendelsprünge Aufschluß erteilen sollen. Änderungen des magnetischen Momentes der Invarpendel können nicht zur Erklärung der Pendelsprünge angenommen werden (§ 4). Vielmehr scheinen die unregelmäßigen Pendelsprünge auf Änderungen der Schneidenauflagen zu beruhen: Die Beseitigung der Trockenreibung durch Schmieren der Pendeltische brachte eine Verminderung der Änderung der Schwingungsdauerdifferenzen (Erhöhung der inneren Genauigkeit der Pendel) (§ 5).

Die Erfahrungen der vorletzten Reichsvermessung 1934 hatten gezeigt, daß die erwartete Fehlergrenze der relativen Pendelmessungen von $\pm$ 1 mgal nicht erreicht worden war. Der Vergleich unabhängig voneinander, mit Pendel und Gravimeter gewonnener Meßergebnisse hatte außer systematischen Abweichungen mittlere Fehler von 2 bis 3 mgal ergeben.

Es ergab sich daher bei der letzten Reichsvermessung 1935 die Aufgabe, neue, zuverlässige Angaben über die Fehlergrenze der Pendelmessungen zu bekommen. Vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Lösung dieser Aufgabe liefern:

I. wird durch Vergleich verschiedener Uhren und Pendel die erreichte Genauigkeit der Göttinger Basisstation bestimmt.

II. werden Versuche mitgeteilt, die die Änderung der Schwingungsdauer von Pendeln erklären sollen.

Die den Untersuchungen I. zugrunde liegenden Messungen und Berechnungen der Basisstation wurden gemeinsam von Dr. H. Jung und Dr. Bungers (Basispendel), Dr. Schulze (Riefleruhr), cand. phys. Köller (Auswertungen) und cand. phys. Patzke (Versuchspendel) durchgeführt, wobei gelegentlich gegenseitige Aushilfe geleistet wurde.

I. Erreichte Genauigkeit der Basismessung

im Geophysikalischen Institut Göttingen während der Pendelmessungen der Geophysikalischen Reichsaufnahme 1935

§ 1. Die Zeitmesser der Basisstation Göttingen. Die zweistündige Beobachtungszeit für die Pendelmessungen der Feldstationen wurde durch drahtlose Signale des Weimarer Militärsenders (Wellenlänge 1000 m) festgelegt*). Dieses Zeitintervall mußte durch die Basisstationen kontrolliert werden. Dazu wurden in Göttingen als Zeitmesser verwandt:

eine Riefleruhr mit Luftdruckkompensation, elektrischem Antrieb und elektrischen Sekundenkontakten:

zwei freischwingende Invarpendel Sterneckscher Form mit Stahlschneiden in einem Askania-Vierpendelapparat. Die Pendeltische waren aus Achat.

Die Sekundenkontakte der Riefleruhr und die Pendelschwingungen wurden zusammen mit den Zeitzeichen des Weimarer Senders optisch aufgezeichnet. Die Filmgeschwindigkeit betrug 10 cm/sec.

Der Gang der Riefleruhr wurde täglich durch die Quarzuhren des Geodätischen Institutes Potsdam über die internationalen Zeitzeichen von Rugby und Nauen (11^h bzw. 13^h MEZ) kontrolliert. Der Gang der Quarzuhren kann als konstant angenommen werden. Die maximale Gangschwankung beträgt nach Veröffentlichungen des Geodätischen Institutes[1]) $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ s/d $= 0.1$ mgal**). Das ist eine Zehnerpotenz weniger als die zu diskutierenden Gangänderungen der Riefleruhr.

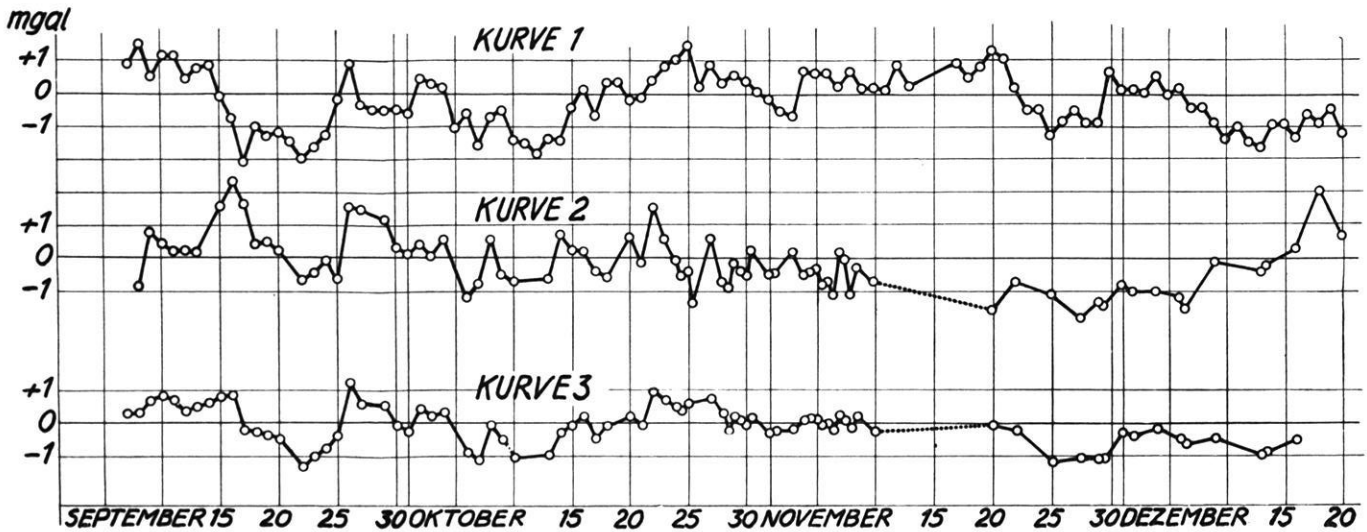
Der aus den täglich festgestellten Standunterschieden der Riefleruhr gegen die Quarzuhren ermittelte Gang wurde für den ganzen Tag von einem Mittag zum nächsten als konstant angenommen. Die Erfahrung hat gezeigt, daß man mit dieser Annahme im allgemeinen für das Zweistundenintervall brauchbare Korrektionen erhält. Das korrigierte Zweistundenintervall diente zur Beurteilung der Pendel als Zeitnormale.

---

*) Die Reichsanstalt für Erdbebenforschung, Jena, hatte die Sendung der Zeitzeichen durch den Sender Weimar übernommen.

**) Die Änderung der Schwingungsdauern von Uhren und Pendeln zur Beurteilung ihrer Brauchbarkeit für Schweremessungen wird am zweckmäßigsten in Milligal angegeben. Es entspricht 1 mgal einer Schwingungsdaueränderung von $5 \cdot 10^{-7}$ sec für das Sekundenpendel. $5 \cdot 10^{-3}$ sec Gangänderung pro Tag entsprechen 0.12 mgal.

Tafel I



Kurve 1: Tägliche Gangabweichung der Riefleruhr von einem mittleren, konstanten Gang

Kurve 2: Abweichung der Schwingungsdauer von Pendel 2 von einer mittleren, konstanten Schwingungsdauer

Kurve 3: Tägliche Gangabweichung des aus Riefleruhr und Pendel 2 gemittelten Zeitmessers von einem mittleren konstanten Gang

Die aus dem Vergleich mit den Quarzuhren errechnete mittlere tägliche Gangänderung der Riefleruhr ist auf Tafel I als Kurve 1 gezeichnet. Die Schwankungen um einen während der ganzen Meßzeit der Reichsaufnahme konstanten Gang betragen im Mittel $\pm$ 0.84 mgal. In § 2 sind die Gangschwankungen als „Uhrfehler" zusammen mit den Genauigkeitsangaben der anderen Zeitmesser zusammengestellt.

Kurve 2 gibt die auf das korrigierte 2-Stunden-Intervall bezogene Änderung der Schwingungsdauer von Pendel 2*).

Die Schwankungen der Kurve 2 betragen im Mittel $\pm$ 0.7 mgal: 84% aller Werte bis zum 10. XI. weichen um weniger als 1 mgal von der „mittleren Schwingungsdauer" des Pendels 2 ab. Damit ist gezeigt, daß

1. die Annahme berechtigt ist, innerhalb der Fehlergrenze von $\pm$ 1 mgal die Gangschwankungen der Riefleruhr während des Zeitraumes von 2 Stunden den mittleren täglichen Gangänderungen gleichzusetzen;

2. die Schwankungen von T_2 sich bis auf wenige Ausnahmen in diesen Grenzen halten.

Pendel 2 ist sicher zu ungünstig beurteilt, wenn man die Schwankungen der Kurve 2 als Schwankungen von T_2 annimmt. In der Kurve ist noch der Fehler enthalten, um den das 24-Stunden-Mittel des Riefleruhrganges von dem 2-Stunden-Mittel abweicht. Um zu einer Abschätzung dieses Fehlers zu gelangen, ist noch ein dritter, unabhängiger Zeitmesser nötig, der jedoch der Göttinger Basisstation nicht zur Verfügung stand. Pendel 4 hat sich während der Reichsvermessung als zu schlecht erwiesen, um als Basispendel gebraucht werden zu können. Selbst unter Zugrundelegen eines während der Meßzeit veränderlichen Ganges weist P_4 Sprünge von über 3 mgal auf, außerdem eine Reihe systematischer Sprünge, über die in einer späteren Arbeit berichtet werden soll (vgl. § 3).

Die Reichsanstalt für Erdbebenforschung Jena stellte dankenswerterweise Material ihrer Basisstation zur Verfügung, womit eine weitere Fehlerabschätzung möglich wurde. Da die Basisstation Jena die gleichen Weimarer Zeitzeichen empfing und ihre Pendel gleichfalls über eine Riefleruhr an die Potsdamer Quarzuhren angeschlossen waren, konnten durch doppelten Vergleich der Pendel, einmal über die Weimarer Signale, zum anderen über die Quarzuhren, die wahren Sprünge des Pendels 2 sichergestellt werden. Hiernach sind die Schwankungen der Kurve 2 am 26. IX. und 22. X. als Pendelsprünge zu deuten; dagegen ist anzunehmen, daß die Schwankungen der Kurve von 2 mgal um den 16. IX. Fehler der Riefleruhr sind.

---

*) Die beiden Pendel der Basisstation Göttingen tragen die Nummern 2 und 4 und sind im folgenden mit P_2 und P_4 bezeichnet, ihre Schwingungsdauern (Hin- und Hergang = 1 sec) mit T_2 und T_4. Entsprechend sei T_R die Schwingungszeit (Sekundenlänge) der Riefleruhr.

§ 2. Genauigkeit der Filmauswertungen und der Signalaufzeichnungen. Bei guter optischer Aufzeichnung lassen sich Pendelschwingungen und Kontakteinsätze auf 0.1 mm genau ablesen. Bei 10 cm/sec Registriergeschwindigkeit ergibt das eine Genauigkeit der Zeitbestimmung von $1 \cdot 10^{-3}$ sec. Diese Genauigkeit wird praktisch auch erreicht, was man durch Vergleich der Ablesungen gleicher Zeitmarken von verschiedenen Beobachtern bestätigen kann.

214 Zeicheneinsätze der Göttinger Registrierungen waren von je zwei verschiedenen Beobachtern ausgemessen worden. Die Abweichungen der Auswertungen untereinander sind aus Tabelle 1 zu ersehen.

Tabelle 1. Fehlerverteilung der Filmauswertungen

Abweichungen in 10^{-3} sec	0— 1	1— 2	2— 3	3— 4
Anzahl der Beobachtungen	132	65	16	1

Hieraus berechnet sich der mittlere Fehler einer Ablesung zu $\pm 0.8 \cdot 10^{-3}$ sec, in guter Übereinstimmung mit obiger Überlegung.

Ein abgegrenztes Zeitintervall wird bei je einer Ablesung seiner Grenzen im Mittel auf $\sqrt{2} \cdot 0.8 \cdot 10^{-3}$ sec $= \pm 1.1 \cdot 10^{-3}$ sec genau bestimmt.

Zur Erhöhung der Auswertgenauigkeit wurden im Durchschnitt bei jeder Pendelmessung 4 Sekunden-Einsätze zur Bestimmung der Grenzen des 2-Stunden-Intervalls benutzt. Dadurch wird der mittlere Fehler der Zeitbestimmung auf die Hälfte herabgesetzt. Man erhält also eine mittlere Genauigkeit des Zeitintervalls von $\pm 0.6 \cdot 10^{-3}$ sec. In Milligal umgerechnet beträgt dieser Fehler für 2-Stunden-Messungen ± 0.17 mgal.

Zur Beantwortung der Frage, ob durch verschiedene Relaisverzögerungen der Basis- und Feldstation gleiche Zeitintervalle verschieden lang aufgezeichnet werden, wurden die Registrierungen derselben Weimarer Zeitsignale von der Basisstation Göttingen und der Feldstation Clausthal*) verglichen. Die Differenzen der Aufnahmen gleicher Zeitintervalle sind in den beiden folgenden Tabellen 2 und 3 zusammengestellt.

Tabelle 2. Differenzen der Aufzeichnungen gleicher Sekundenintervalle von verschiedenen Empfangsapparaturen

Differenzen in 10^{-3} sec	0— 1	1— 2	2— 3	3— 4	4— 5	5— 6	6— 7
Anzahl der Beobachtungen	19	10	12	6	6	2	2

Tabelle 3. Differenzen der Aufzeichnungen gleicher 2-Stundenintervalle von verschiedenen Empfangsapparaturen

Differenzen in 10^{-3} sec	0— 2	2— 4	4— 6	6— 8	8— 10
Anzahl der Beobachtungen	23	6	3	1	1

*) Herr Prof. Rössiger hat freundlicherweise die zu der Untersuchung notwendigen Filmauswertungen von Clausthal zur Verfügung gestellt, wofür ich ihm auch an dieser Stelle danken möchte.

Nach beiden Tabellen ergibt sich übereinstimmend ein mittlerer Fehler der Einzelbeobachtung von $\pm 1.1 \cdot 10^{-3}$ sec. Dieser Fehler ist gerade so groß wie der Fehler einer Zeitbestimmung durch die Ungenauigkeit der Ablesung. Hieraus ist zu schließen, daß bei uns der Fehler durch verschiedenen Zeitzeichenempfang — wenn überhaupt vorhanden — klein gegenüber dem Ablesefehler und daher zu vernachlässigen ist.

Durch die Auswertungsfehler wird der Genauigkeit der Pendelmessungen in dem vorliegenden Falle eine Grenze von 0.2 mgal gesetzt.

§ 3. Die erreichte Genauigkeit der Göttinger Basisstation. Die in § 2 angegebene Genauigkeitsgrenze ist bei den Pendelmessungen nicht erreicht. Der mittlere „Fehler" des Pendels 2 muß nach Kurve 2 zu $\pm$ 0.69 mgal angenommen werden: der Fehler der Riefleruhr beträgt nach Kurve 1 im Mittel $\pm$ 0.84 mgal. Die Ablesefehler durch vermehrten Zeit- und Kostenaufwand noch weiter herabzusetzen, hat also keinen Sinn.

Die Abweichung der Schwingungsdauer $^1/_2 (T_2 + T_R)$ des aus Riefleruhr und Pendel 2 gemittelten „Pendels" $(P_2 R)$ von einem Mittelwert ist in Kurve 3 gezeichnet. Die der Kurve entnommenen Gangschwankungen betragen im Mittel $\pm$ 0.52 mgal; nur ein Wert liegt über 1.2 mgal. Der aus den mittleren Fehlern von P_2 und der Riefleruhr berechnete mittlere Fehler von $(P_2 R)$ ist:

$$^1/_2 \sqrt{0.69^2 + 0.84^2} = 0.54 \text{ mgal}$$

in guter Übereinstimmung mit dem aus Kurve 3 bestimmten mittleren Fehler.

In den Fig. 1 bis 4 sind die Fehlerverteilungen von Riefleruhr, P_2, P_4 und $(P_2 R)$ und die aus der Fehlerverteilung berechneten Gaußschen Fehlerkurven gezeichnet. Die Übereinstimmung von Fehlerverteilung und Fehlerkurve in den Fig. 1, 2 und 4 deutet darauf hin, daß außer bei P_4 systematische Gangänderungen dieser Zeitmesser nicht vorliegen. Fig. 3 zeigt 1. die großen Schwankungen von T_4, 2. systematische Sprünge von P_4, die sich in bevorzugten Fehlern von $\pm$ 1 mgal bemerkbar machen. Die systematischen Sprünge von P_4 betragen 2 mgal. Der Fehler von 1 mgal kommt dadurch zustande, daß für P_4 ein langsam veränderlicher Gang angenommen ist, zu dem die Abweichungen von T_4 symmetrisch liegen.

Zur Kontrolle für die Veränderungen der Feldpendel während der Reichsvermessung führte der Weg der Feldstation in Schleifen zu schon vermessenen Stationen zurück und über Hauptanschlußpunkte, deren relative Schwerewerte durch vierfache Messungen des Geodätischen Institutes Potsdam mit großer Genauigkeit bestimmt waren.

Zur Auswertung der Pendelmessungen ist es daher nur erforderlich, daß für jede Meßschleife die Basisstation „ihr Niveau gehalten" hat. Es ist also ohne weiteres erlaubt, anstatt die ganze Kurve 2 (bzw. Kurve 3) durch einen linearen Gang auszugleichen, dieses für die einzelnen Zeitabschnitte der Meßschleifen zu tun. Unter Berücksichtigung der Schleifenbildung erhält man für die Kurven 2 und 3 Fehlerwerte, wie sie in den Fig. 5 und 6 dargestellt sind. Die Steigerung der

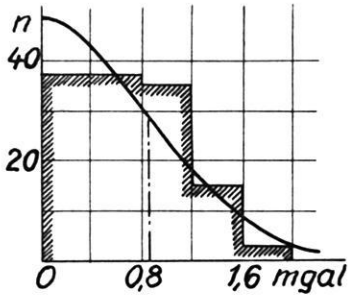


Fig. 1

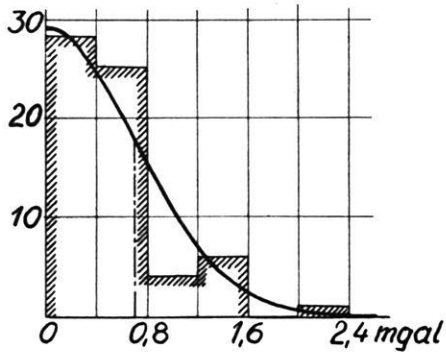


Fig. 2

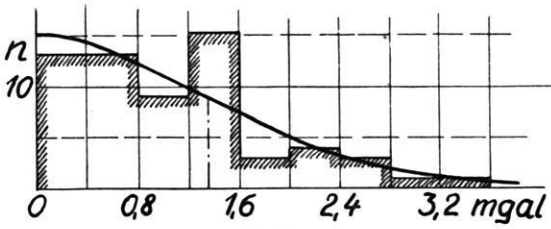


Fig. 3

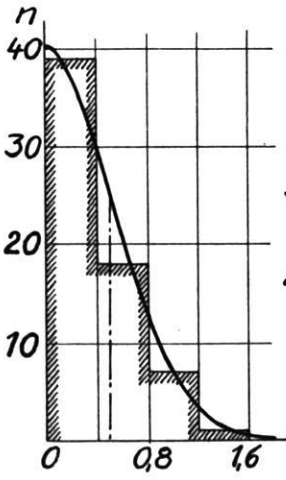


Fig. 4

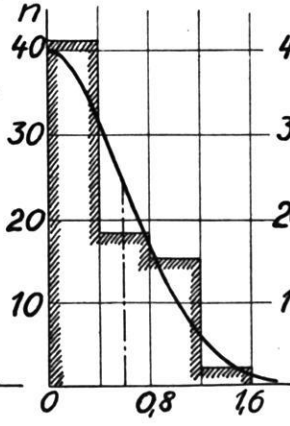


Fig. 5

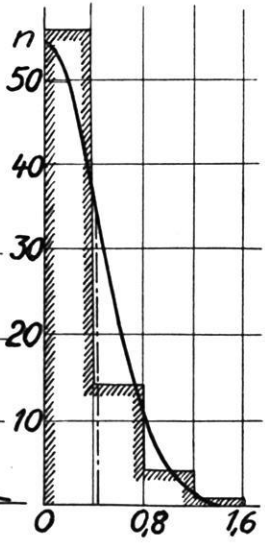


Fig. 6

Fig. 1 bis 6. Fehlerverteilung in Fehlerintervallen von 0.4 mgal und Gaußsche Fehlerkurven der Zeitmesser der Göttinger Basisstation

Fig. 1: Riefleruhr. Fig. 2: Pendel 2. Fig. 3: Pendel 4. Fig. 4: Mittleres Pendel ($P_2 R$). Fig. 5: Pendel 2 unter Berücksichtigung der Schleifenbildung der Feldstation. Fig. 6: Mittleres Pendel unter Berücksichtigung der Schleifenbildung

Ordinateneinheit ist so gewählt, daß die Flächeninhalte der Figuren gleich sind. Dann ist die Steilheit der Fehlerkurven ein Maß für die Güte der Zeitmesser. Die „Fehler" sind die Gangänderungen der Zeitmesser, auf einen konstanten Gang bezogen, mit Ausnahme von Fig. 3. Für P_4 ist ein veränderlicher Gang angenommen. Strichpunktierte Linien deuten die mittleren Fehler an.

Genauigkeit der Basisstation beträgt in beiden Fällen etwa 0.1 mgal. Für P_2 ergibt sich eine mittlere Änderung der Schwingungsdauer von $\pm$ 0.60 mgal, für $(P_2 R)$: $\pm$ 0.42 mgal.

Diese Werte sind als die erreichte mittlere Genauigkeit der Basisstation Göttingen für die Pendelmessungen der Geophysikalischen Reichsaufnahme 1935 anzusehen.

In Tabelle 4 sind die Gesamtleistungen der Zeitmesser der Basisstation Göttingen zusammengestellt.

Tabelle 4. Genauigkeit der Zeitmesser der Basisstation Göttingen

Zeitmesser	Anzahl der Gangfehler (in %)					Gangfehler in mgal	
	0–0.4	0.5–0.8	0.9–1.2	1.3–1.6	über 1.6	mittl.	max.
Riefleruhr	29	29	28	12	2	0.84	2.0
Pendel 2	44	39	6	9	2	0.69	2.3
Mittleres Pendel $(P_2 R)$	60	28	11	1	0	0.52	1.6
P_2 unter Berücksichtigung der Schleifenbildung der Feldstation	54	24	20	2	0	0.60	1.4
$(P_2 R)$ unter Berücksichtigung der Schleifenbildung	74	19	6	1	0	0.42	1.5

Nimmt man als mittlere Genauigkeit der Basisstation Göttingen rund 0.5 mgal und den gleichen Wert für die Feldmessung, so ergibt sich hieraus für die Schweremessungen ein mittlerer Fehler von 0.7 mgal, und es scheint demnach die für Schweremessungen erforderliche Genauigkeit von 1 mgal schon bei Verwendung einer Basisstation erreicht zu sein. Demgegenüber ist jedoch zu bemerken, daß es für die geologische Verwendbarkeit der Schweremessungen nicht auf die mittleren Fehler ankommt, sondern auf die Fehler der einzelnen vermessenen Stationen. Es müssen also grobe Abweichungen der Basismessungen, auch wenn sie nur in geringer Zahl vorkommen, als solche erkannt und beseitigt werden. Deshalb erweist es sich als notwendig, mindestens eine zweite Basisstation zu unterhalten. Bei der Reichsvermessung 1935 war in Jena und in Göttingen eine Basisstation vorhanden, außerdem hat für den größten Teil der Zeit in Clausthal ein Zeitmesser registriert (Bifilarpendel von M. Rössiger). Alle drei Basisstationen wurden bei der Auswertung der Feldmessungen verwendet.

II. Versuche zur Erklärung der Fehler der Basismessung. Experimentelle Untersuchungen über Änderungen der Schwingungsdauer der Pendel

§ 4. Einfluß der Schwankungen des magnetischen Momentes von Invarpendeln. Invarpendel werden unter dem Einfluß des erdmagnetischen Feldes zu Magneten mit einem magnetischen Moment $\mathfrak{M}$. Die Hysteresis des Invarstahles hat zur Folge, daß sich ihr magnetisches Moment aus einem induzierten und einem von der Vorgeschichte des Pendels abhängigen permanenten Moment zusammensetzt. Ist Z

die Vertikalintensität des Erdfeldes, so ist die auf das Pendel wirksame zusätzliche Direktionskraft $D_m = \mathfrak{M} \cdot Z$.

Nach Messungen von Bullard[2]), Martin[3]) und Rössiger[4]) und nach unveröffentlichten Untersuchungen von Ackemann im Geophysikalischen Institut Göttingen betragen die magnetischen Momente von Invarpendeln Sterneckscher Form im Erdfeld bis zu 170 CGS-Einheiten. Hiernach läßt sich eine obere Grenze für den Anteil der magnetischen Direktionskraft D_m an der gesamten Direktionskraft

$$D = mgl + \mathfrak{M} \cdot Z$$

angeben. Für $m = 1000$ g, $l = 25$ cm, $\mathfrak{M} = 200$ CGS, $Z = 0.5$ Gauß ist:

$$\frac{D_m}{D} = \frac{100}{25 \cdot 10^6} = 4 \cdot 10^{-6}.$$

Das erdmagnetische Feld wirkt auf Invarpendel mit einer zusätzlichen Beschleunigung, die einer Änderung der Schwerkraft ($g \approx 10^6$ mgal) um 4 mgal entspricht.

Die beobachteten permanenten Momente der Pendel sind im allgemeinen klein gegenüber dem Gesamtmoment M ($\approx 20\,\%$). Dadurch, daß mehrere Pendel nebeneinander mit gleichgerichteten Momenten (Nordpol unten) im Pendeltopf hängen, schwächen sie gegenseitig das induzierende Magnetfeld. Hierdurch wird die oben angegebene obere Grenze des magnetischen Anteils am Richtmoment der Pendel etwas herabgesetzt. Dieser Betrag von 1 bis $3 \cdot 10^{-2}$ Gauß, um den das Erdfeld geschwächt wird, ist zu vernachlässigen gegenüber der Intensität des Erdfeldes von 0.5 Gauß.

Bullard[2]) hat Schwankungen des magnetischen Momentes von Invarpendeln beobachtet, die ausreichen können, um die Schwingungszeitänderungen der Pendel, wie sie üblicherweise beobachtet werden, zu erklären. Es würde nach dem Vorhergehenden eine Schwankung des Momentes um 25 % einer Änderung der Schwingungsdauer von 1 mgal entsprechen.

Um zu untersuchen, ob Schwankungen des magnetischen Momentes der im Geophysikalischen Institut Göttingen verwandten Invarpendel die Ursache für Pendelsprünge sind, wurde über eine Zeit von einem Monat die Schwingungsdauerdifferenz der Invarpendel 1 und 3 und gleichzeitig das Verhältnis ihrer magnetischen Momente gemessen.

Für die Entwicklung der Meßmethode war maßgebend, die Pendel während der Meßzeit durch keinen mechanischen Eingriff zu stören. Damit schied die Bestimmung der magnetischen Momente nach der Gaußschen Methode (Messung in den Hauptlagen) aus. Es wurde unter Verzicht von Absolutmessungen folgende Meßanordnung gewählt:

Ein kleines, annähernd astatisches Magnetometer mit Bifilaraufhängung (Kokonfäden) schwang zwischen den beiden Pendeln im Pendeltopf. Die beiden Magnete waren aus gehärteten Nähnadeln hergestellt und nur schwach magnetisiert. Fig. 7 zeigt die Anordnung des Magnetometersystems. Durch Nähern eines Pendels

erfolgt ein Ausschlag des Magnetometers, der mit einem Lichtzeiger an einer Glasskala sichtbar gemacht wird. Der Ausschlag des Pendels wird gleichzeitig auf dem Registrierfilm aufgenommen und hier ausgemessen. Bei einer seitlichen Verrückung der Pendellinse um $\Delta = 0.3$ cm dreht sich das Magnetometer um 3^0 aus der Ruhelage.

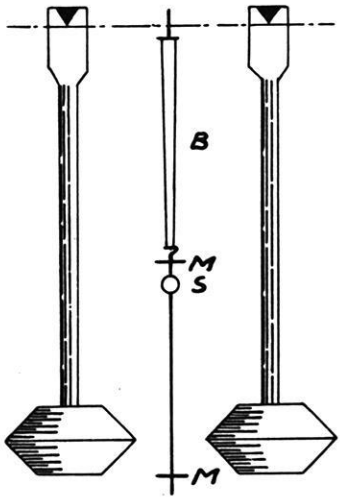


Fig. 7. Astatisches Magnetometer mit Bifilaraufhängung zwischen zwei Pendeln im Pendeltopf

M Magnetnadeln, *S* Spiegel, *B* Bifilaraufhängung. Die Magnete sind im Pendeltopf um 90^0 gedreht

Wenn Δ klein ist gegenüber dem Abstand Magnetometer—Pendelpol, dann ist die wirksame Coulombkraft:

$$k \sim \mathfrak{M} \cdot \mathfrak{m} \cdot \Delta,$$

wobei bedeuten: $\mathfrak{M}$ das magnetische Moment des Pendels, $\mathfrak{m}$ das magnetische Moment des unteren Magneten am Magnetometer, Δ die lineare Verrückung der Pendellinse. Es ist also das Verhältnis der magnetischen Momente von P_3 und P_1:

$$\frac{\mathfrak{M}_3}{\mathfrak{M}_1} = \frac{k_3 \cdot \Delta_1}{k_1 \cdot \Delta_3},$$

$\mathfrak{m}$ fällt bei der Quotientenbildung heraus; man ist damit frei von der zeitlichen Veränderlichkeit von $\mathfrak{m}$. Notwendig ist nur, daß $\mathfrak{m}$ während der Dauer einer Messung (2 bis 5 min) konstant bleibt.

Tabelle 5. Verhältnis der magnetischen Momente von Pendel 3 und 1

Datum	$M_3 : M_1$	Datum	$M_3 : M_1$	Datum	$M_3 : M_1$
7. XII.	1.69	10. XII.	1.73	17. XII.	1.74
7. XII.	1.65	11. XII.	1.74	18. XII.	1.73
8. XII.	1.71	12. XII.	1.76	18. XII.	1.77
9. XII.	1.75	13. XII.	1.74	19. XII.	1.75
9. XII.	1.73	14. XII.	1.74	19. XII.	1.73
10. XII.	1.75	16. XII.	1.75	20. XII.	1.73

In Tabelle 5 sind die Messungen zusammengestellt.

Fig. 8 zeigt ihre graphische Darstellung. $\mathfrak{M}_3 : \mathfrak{M}_1 = 1.74$ ist innerhalb der Meßfehler als konstant anzusehen. Auf keinen Fall lassen sich Pendelsprünge von 1 mgal durch Schwankungen des magnetischen Momentes der Pendel erklären. Es müßte bei einer Änderung des magnetischen Momentes um 25 % entsprechend einer Änderung von $T_1 - T_3$ um 1 mgal $\mathfrak{M}_3 : \mathfrak{M}_1 = 2.2$ bzw. 1.3 werden, eine Änderung, die größer als die Meßgenauigkeit ist und somit hätte beobachtet werden müssen. Außerdem müßten die Kurven $T_1 - T_3$ und $\mathfrak{M}_3 : \mathfrak{M}_1$ parallel laufen.

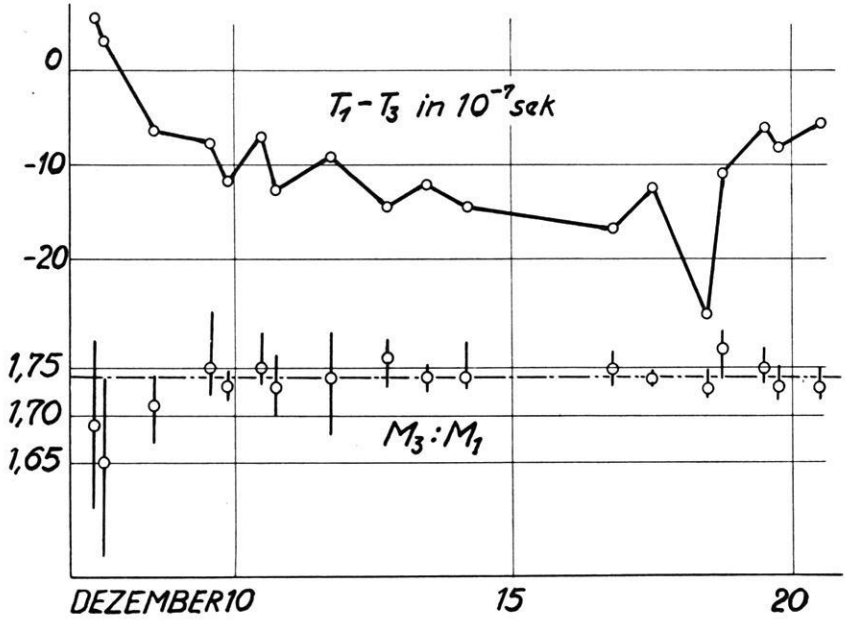


Fig. 8. Verhältnis der magnetischen Pendelmomente und die Differenz der Schwingungsdauern $T_1 - T_3$. Beobachtung vom 7. bis 20. Dez. 1935

Der Pendelsprung am 18. XII. rührt von einer beabsichtigten mechanischen Störung her. Die Länge der vertikalen Striche gibt die Größe der Meßfehler an.

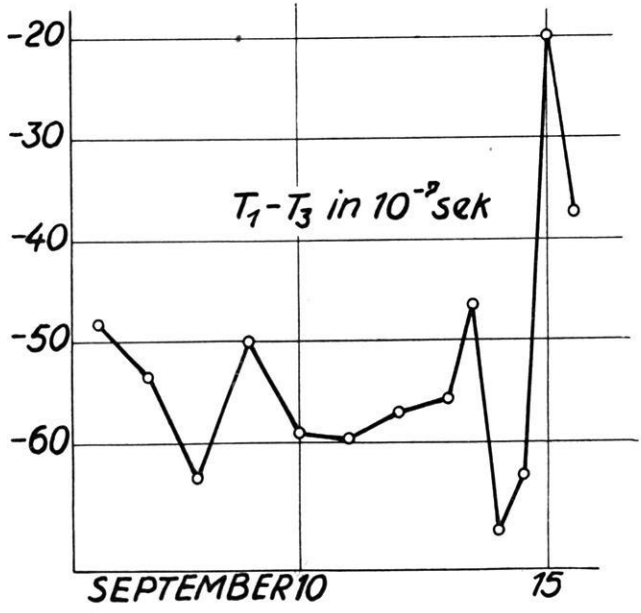


Fig. 9. Differenz der Schwingungsdauern $T_1 - T_3$ der Pendel 1 und 3 mit ungeölten Auflagen

§ 5. Einfluß des Schmierens der Pendeltische. Es scheint die Annahme gerechtfertigt, daß Veränderungen der Pendelauflagen die Ursache für die beobachteten Pendelsprünge sind. Es ist zu erwarten, daß unstetige Abnutzung der Schneiden

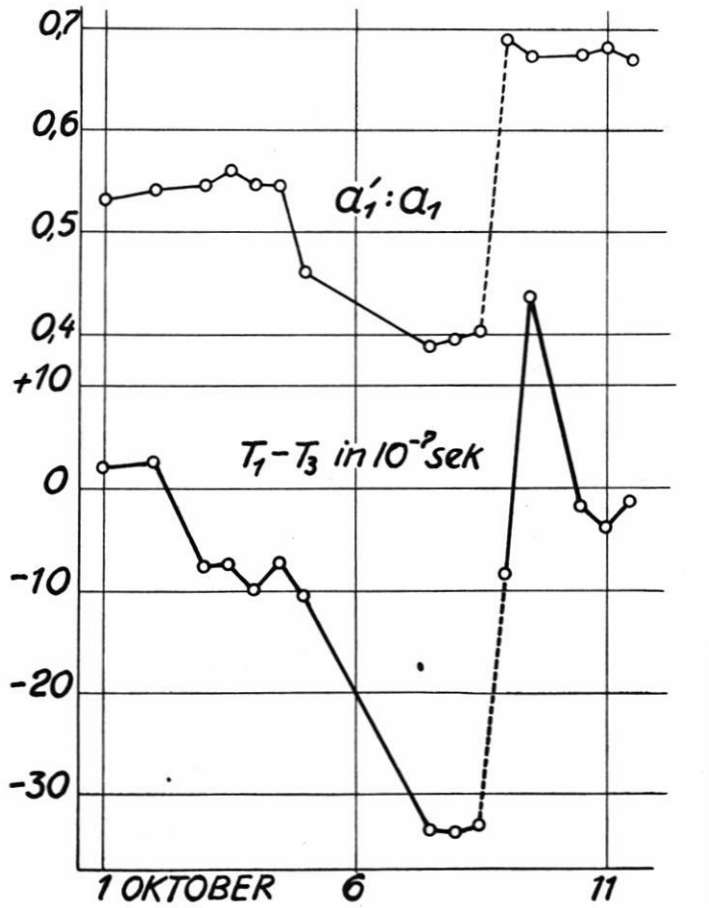


Fig. 10. Differenz der Schwingungsdauern $T_1 - T_3$ zu Beginn der Schmierung der Pendeltische. — Verhältnis der Amplituden $a_1' : a_1$ des Pendels 1 zu Ende und zu Beginn des Zweistundenintervalles

Zwischen den gestrichelt verbundenen Messungen wurden die Pendeltische gereinigt und neu geschmiert.

sprunghafte Änderungen der Schwingungsdauer hervorrufen. Man wird außerdem immer nur Schneidenauflagen in wenigen Punkten der Schneide erhalten (2-Punkt-Auflage), so daß an diesen Stellen das Schneiden- und Auflagematerial überbeansprucht ist. Ein „Abschleifen" während des Pendelns ist nicht zu erwarten, wie es etwa bei bewegten Maschinenteilen während des Arbeitsprozesses geschieht.

Dafür sind die Schleif- und Polierbedingungen nicht erfüllt. Durch geeignete Wahl des Materials lassen sich die schädlichen Einflüsse der Trockenreibung herabsetzen, etwa bei Verwendung von Stahlschneiden auf Achatunterlagen. [Hierzu Unter-

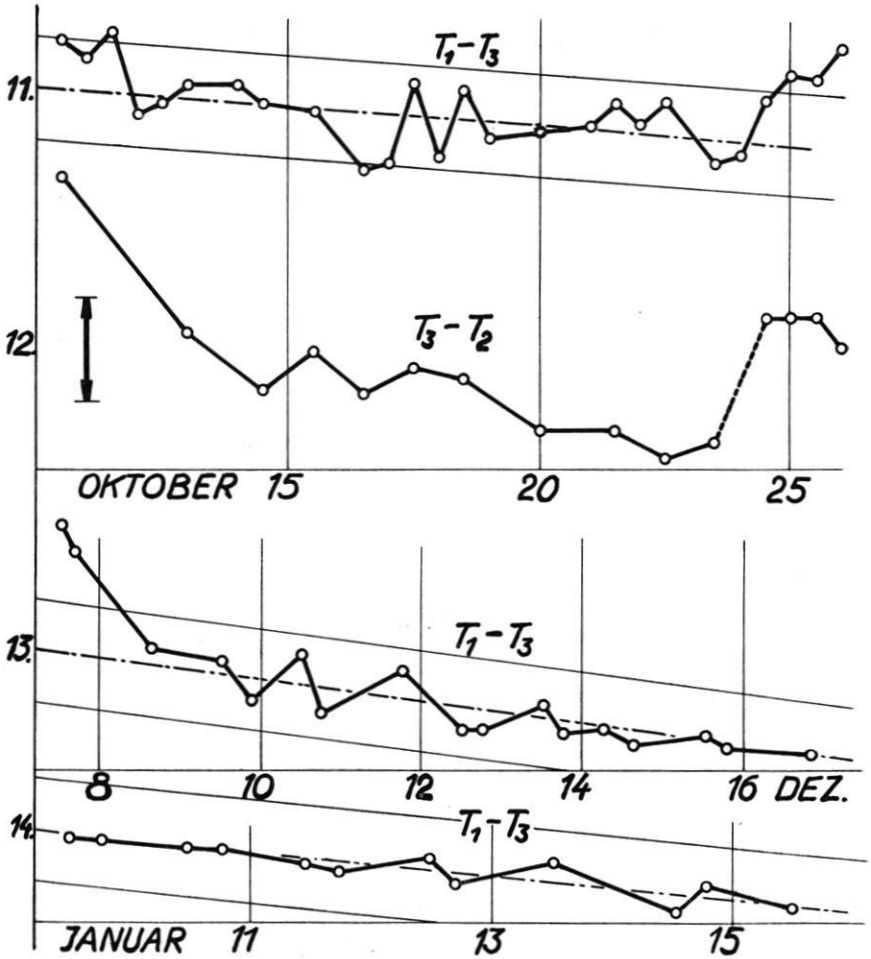


Fig. 11 bis 14. Fig. 11, 13 und 14. Differenz der Schwingungsdauern von Pendel 1 und 3 mit geschmierten Pendeltischen. Fig. 12 (zum Vergleich). Differenz der Schwingungsdauern des Pendels 3 und des ungeschmierten Basispendels 2

Höhe des Doppelpfeiles = 2 mgal (für alle Figuren).

suchungen von Meisser[5]), wo Mikroaufnahmen von Stahl- und Achatschneiden mitgeteilt sind].

Es wurde versucht, durch Schmieren der Pendeltische die Trockenreibung zu beseitigen und dadurch die Bedingungen für ein Einschleifen der Schneiden

während des Pendelns zu schaffen. Gleichzeitig schützte das Schmiermittel (Öl) die Berührungsfläche von Pendeltisch und -schneide vor Staubeinlagerungen. Man darf nur soviel Öl zum Schmieren verwenden, wie durch Adhäsion auf den Pendeltischen haften bleibt (Grenzschmierung). Man feuchtet etwas Watte sehr wenig mit dem Öl an, hüllt den Wattebausch in einen nichtfasernden Stoff (es eignet sich gut Serviettenpapier, da dies vor allem auch sauber ist) und fährt damit über die Tische. Danach wischt man die Pendeltische mit trockener, eingehüllter Watte wieder so weit ab, wie es möglich ist.

Zum Schmieren der Pendeltische wurde ein Destillat eines Autoöles der Standard Oil Comp. benutzt*).

Der Pendeltopf war ein älterer Apparat, dessen Tische neu poliert waren.

Fig. 9 zeigt die Schwingungsdifferenzen $T_1 - T_3$ der ungeölten Pendel. Fig. 10 bis 14 zeigen nacheinander die Wirkung des Schmierens.

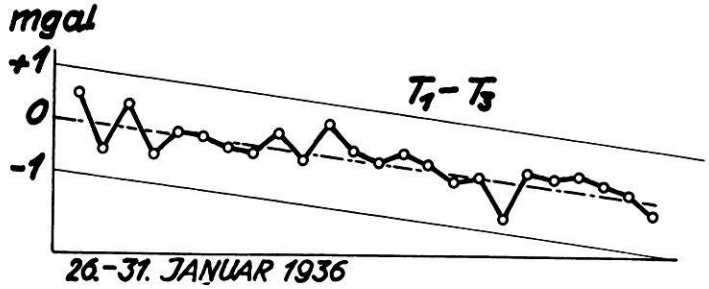


Fig. 15
Differenz der Schwingungsdauern der Pendel 1 und 3 mit geschmierten Pendeltischen (Beobachtungszeit eine Woche, täglich drei bis fünf Pendelmessungen.)

Die Beobachtungszeit erstreckte sich von Oktober 1935 bis einschließlich Januar 1936. Zunächst auftretende erhebliche Unregelmäßigkeiten und starke Dämpfungszunahme wurden durch Säubern der Lager und neues Schmieren beseitigt.

Bemerkenswert ist die zunehmende Unempfindlichkeit der Pendel gegen mechanische Störungen, was darauf hinweist, daß die Auflage besser geworden ist. In Fig. 15 ist eine Meßreihe von einer Woche aufgetragen, bei der täglich drei bis fünf Messungen vorgenommen sind. Die Pendel wurden zwischen den Messungen teils arretiert, teils durch die Anstoßvorrichtung aufgefangen. Auch während dieser Zeit hoher mechanischer Beanspruchung liegen die Pendelsprünge unter 1 mgal.

In der folgenden Tabelle 6 sind die Abweichungen der Schwingungsdauerdifferenzen von einem mittleren, säkularen Gang: $\Delta (T_1 - T_3)$ der Fig. 11, 13, 14 und 15 zusammengestellt.

---

*) Herr Dr. Kyropoulos war so freundlich, mir dieses Öl zur Verfügung zu stellen; außerdem verdanke ich ihm manchen wertvollen Ratschlag, für den ich auch an dieser Stelle danken möchte.

Fig. 16 gibt eine Darstellung der Dämpfungsverhältnisse bei geschmierten (×) und trockenen (○) Pendelauflagen. Es ist das Verhältnis $a' : a$ der Amplituden zu

Tabelle 6
Innere Genauigkeit der geschmierten Pendel. (Die beiden ersten Messungen in Fig. 13 und die vier letzten in Fig. 11 sind nicht berücksichtigt.)

$\Delta(T_1 - T_3)$ in mgal	Anzahl der Werte	in %
0 — 0.2	32	44
0.2 — 0.4	21	29
0.4 — 0.6	12	16
0.6 — 0.8	4	5
0.8 — 1.0	2	3
1.0 — 1.2	2	3

Ende und zu Beginn des 2-Stunden-Intervalls in Abhängigkeit vom Luftdruck im Pendeltopf aufgetragen. Die Werte des Amplitudenverhältnisses für ungeschmierte

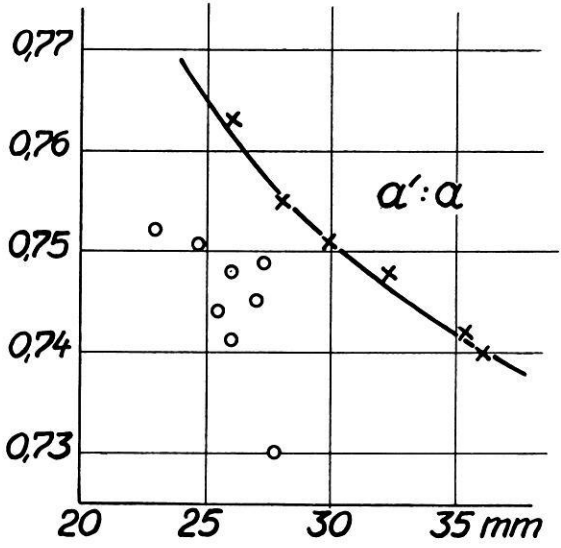


Fig. 16
Verhältnis der aus den Pendeln 1 und 3 gemittelten Amplituden zu Ende und zu Beginn des zweistündigen Beobachtungszeitraumes in Abhängigkeit vom Luftdruck im Pendeltopf
× Amplitudenverhältnis der Pendel mit trockenen Tischen, ○ Amplitudenverhältnis der Pendel mit geschmierten Tischen.

Pendel sind der Pendelmessung Anfang September entnommen. Die Dämpfung streut stark, da die Pendel schlecht waren. Aus Fig. 16 ersieht man:

Die Dämpfung der Pendel bei Grenzschmierung der Pendeltische ist geringer als bei Trockenreibung.

Die Gesetzmäßigkeit der Dämpfung bei geschmierten Pendelauflagen zeigt ebenso deutlich wie die geringe Schwankung der $T_1 - T_3$-Kurven, daß sich bei richtigem Schmieren durchaus konstante Verhältnisse erzielen lassen.

Herrn Prof. G. Angenheister möchte ich für die Anregung zu dieser Arbeit und sein förderndes Interesse herzlich danken, Herrn Dr. H. Jung für seine Hilfe und wertvollen Rat.

Literatur

[1]) Pavel u. Uhink: Astron. Nachr. Nr. 6167/68, 257 (1935).
[2]) Bullard: Proc. of the Cambridge Phil. Soc. **29**, 2 (1933).
[3]) Martin: Veröffentl. d. Reichsanst. f. Erdbebenforsch. Jena **17**, 120 (1931).
[4]) Rössiger: Zeitschr. f. Instrumentenkde. **50**, 551 (1930).
[5]) Meisser: Zeitschr. f. Geophys. **9**, 173 (1933).

Göttingen, Geophysikalisches Institut, Juli 1936.

Referate und Mitteilungen

O. v. Schubert: *Quantitative Untersuchungen zur Statik und Dynamik des Atlantischen Ozeans.* Wissensch. Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff „Meteor" 1925—1927. Band VI. 2. Teil. Erste Lieferung. Die Stabilitätsverhältnisse. 54 Seiten, mit 11 Abbildungen im Text und 7 teils farbigen Beilagen. Berlin und Leipzig 1935, Verlag von Walter de Gruyter & Co.

Für die Feststellung der Wasserarten im ozeanischen Raume und deren Bewegung hat sich die Betrachtung der Verteilung von Temperatur, Salz- und Sauerstoffgehalt als die erfolgreichste Methode erwiesen, die Dichteverteilung ergab weniger Aufschlüsse. Da nun aber durch die „Meteor"-Expedition ein Beobachtungsnetz von bis dahin unerreichter Dichte und Vollständigkeit beigebracht worden war, erschien der Versuch aussichtsreich, die Grenzen zwischen den einzelnen Wasserarten, den Gliedern der Zirkulation im Atlantischen Ozean, noch genauer durch eine Untersuchung der Stabilität festzulegen. Bei dem in der Meereskunde gebräuchlichen Begriff der Stabilität handelt es sich nicht um den im Meere in der Vertikalen tatsächlich vorhandenen Dichteunterschied zwischen zwei Wasserteilchen, sondern um jenen, der sich einstellt, wenn das obere Wasserteilchen ohne Mischung in das Niveau des unteren Teilchens versetzt gedacht wird. Bei der Berechnung der Stabilität, die auf Grund der Hydrographischen Tabellen von Bjerknes nach einem von Hesselberg und Sverdrup eingeführten Verfahren erfolgt, wird die adiabatische Temperaturänderung sowie die Abhängigkeit der Zusammendrückbarkeit des Meerwassers von Temperatur, Salzgehalt und Druck berücksichtigt. Die Stabilitätsberechnungen wurden für alle Meteor-Stationen durchgeführt, und die gewonnenen Werte sind sämtlich veröffentlicht. Da als Tiefen die Standardtiefen gewählt wurden, sind die für die einzelnen Stationen gewonnenen Werte untereinander gut vergleichbar. Die eingehende Diskussion der Stabilitätswerte führte zwar in einzelnen Fällen zu an sich bedeutungsvollen Bestätigungen der auf anderem Wege gewonnenen Anschauungen über die Abgrenzung der Wasserarten, aber die Hoffnung, weitergehende Aufschlüsse über die Zirkulation zu