

Veröffentlichungen
der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena

Herausgegeben vom Direktor August Sieberg

Heft 30

Relative
Schweremessungen
mit Quarzglasstabpendeln
in einem neuzeitlichen Vierpendel-
vakuumapparat

Von

O. Meißer

Mit 10 Abbildungen

1937

Reichsverlagsamt · Berlin NW 40

Veröffentlichungen
der Reichsanstalt für Erdbettenforschung in Jena
Herausgegeben vom Direktor August Sieberg
Heft 30

Relative
Schweremessungen
mit Quarzglasstabpendeln
in einem neuzeitlichen Vierpendel-
vakuumapparat

Von

O. Meißer

Mit 10 Abbildungen

1937

Reichsverlagsamt · Berlin NW 40

$\frac{7}{193} \approx .3853$ 2

Vorwort.

Die neue, an der Reichsanstalt für Erdbebenforschung von Herrn Regierungsrat Prof. Dr. O. MEISSER entwickelte Pendelapparatur mit Quarzglasstabpendeln hat nach ausgiebigen Prüfungen im Gelände mit bestem Erfolg ihre Feuerprobe bestanden gelegentlich der Pendelmessungen, die die Reichsanstalt als Mitglied der Kommission für Geophysikalische Reichsaufnahme während der Jahre 1934 und 1935 durchführte. Infolgedessen erscheint es zweckmäßig, die nachfolgende zusammenfassende Beschreibung der Instrumente und Beobachtungsmethoden den Fachkreisen vorzulegen. Bei dieser Gelegenheit sei der Firma Carl Zeiss in Jena und der Deutschen Forschungsgemeinschaft der wärmste Dank abgestattet für die auch hier wieder im weitesten Umfange gewährten Beihilfen.

Jena, im Juli 1937.

A. SIEBERG.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einführung	7
1. Der Pendelapparat.	8
2. Das Registriergerät	10
3. Die Quarzglasstabpendel	12
4. Die Korrekturen der Pendelschwingungsdauern	15
a) Temperaturkorrektur	15
b) Luftdichtekorrektur	15
c) Amplitudenkorrektur	16
d) Mitschwingkorrektur	18
5. Das Auswertverfahren	23
6. Das Beobachtungsverfahren	27
7. Die Genauigkeit der relativen Schweremessungen	28
8. Verzeichnis der angeführten Schriften	31

Einführung.

Seit 1931 verfüge ich über zwei neuzeitliche Pendelapparaturen (Abb. 1), die nach meinen Angaben von der Fa. Zeiss, Jena, in dankenswerter Weise gebaut und für Messungen großzügigst zur Verfügung gestellt wurden. Im Laufe der verflossenen Jahre sind z. T. mit weitgehender Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft die verschieden-

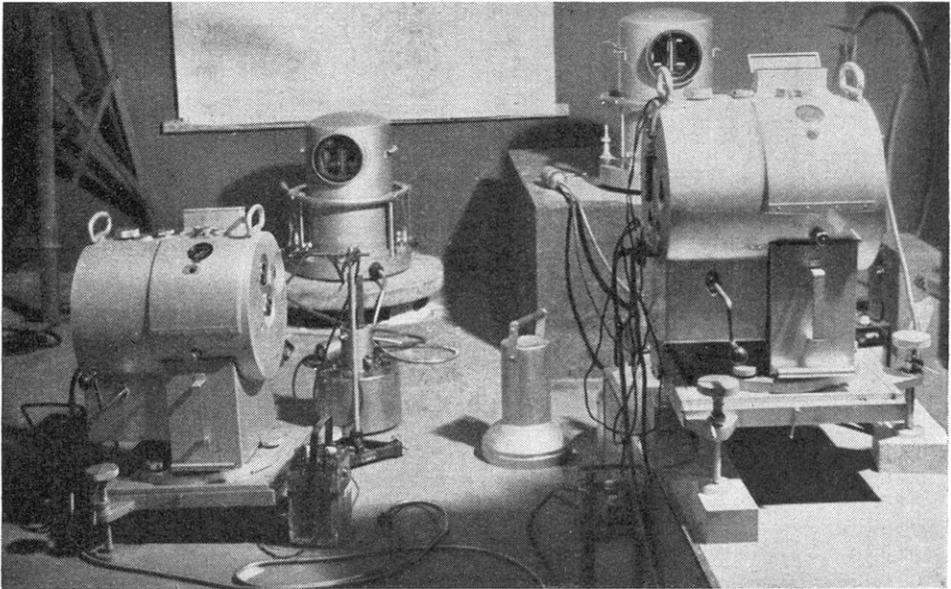


Abb. 1. Schaubild der beiden Pendelapparaturen.

sten Untersuchungen an Pendeln, Pendelschneiden usw. damit ausgeführt. Nach reichlichen Erfahrungen, die im Laboratorium mit diesen Instrumenten und Verfahren gesammelt worden waren, wurden mit ihnen die Pendelmessungen der Reichsanstalt für Erdbebenforschung im Rahmen der geophysikalischen Reichsaufnahme 1934 und 1935 in Nord- und Mitteldeutschland ausgeführt.

Da die Entwicklungs- und kleinen Verbesserungsarbeiten wohl zur Zeit als abgeschlossen betrachtet werden dürfen, soll im folgenden eine kurze zusammenfassende Darstellung meiner zurückliegenden, noch nicht veröffentlichten Untersuchungen und Ergebnisse gegeben werden.

Auch an dieser Stelle ist es mir eine angenehme Pflicht, der Firma Zeiss und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die außerordentlich weitgehenden Unterstützungen zu danken, ohne die diese Arbeiten an der Reichsanstalt für Erdbebenforschung nicht hätten durchgeführt werden können.

1. Der Pendelapparat.

Nach den bisherigen Erfahrungen, die über die Schneidenkonstanz bei Schweremessungen mit Pendeln (1) gewonnen waren, kam nur ein Pendelapparat (Abb. 2) mit vier gleichzeitig schwingenden Pendeln in Frage.

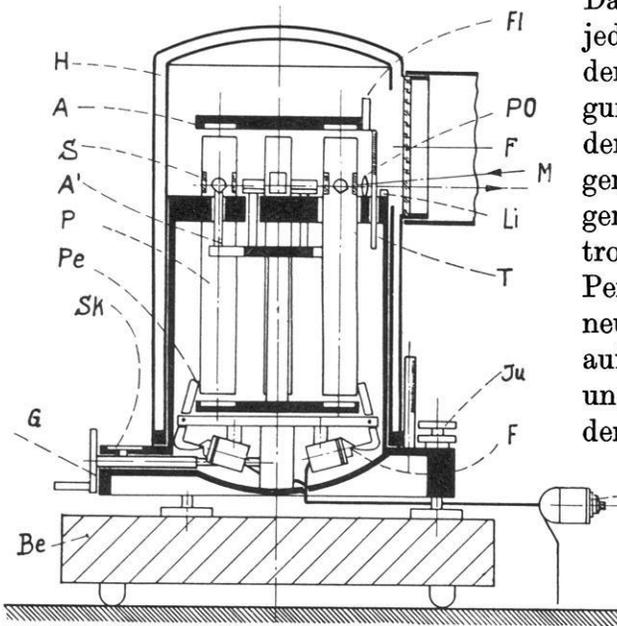


Abb. 2. Schema des Pendelapparats.

H Doppelhaube, A Transportarretierung, A' gewöhnliche Feinarretierung zum Aufsetzen der Schneiden, S Spiegel, P Quarzglasstabpendel, Pe Amplitudengeber, G Antrieb für Amplitudeneinstellung und Arretierung mit Skala Sk, Be Betonplatte, Fl Feuchtigkeitsmesser, PO Pendelspiegel und Objektiv, F (oben) Fenster in der Haube, M verkürztes Hg-Vakuummeter, Li Niveaus, T Thermometer, Ju Fußschrauben, F (unten) Elektromagnete zum Auslösen der Amplitudenhebel, J Schaltrosette.

aushalten. Daneben besitzt der Apparat eine gewöhnliche Arretierung (A'), die das Abheben und Aufsetzen der Schneiden (S) be-

Dadurch gewinnt man bei jeder einzelnen Messung aus der Differenz der Halbschwingungen der Pendel bzw. der der beiden zusammengehörigen mittleren Halbschwingungen der Pendelpaare eine Kontrolle über die Konstanz der Pendel. Um die Arbeit des neuen Einhängens der Pendel auf jeder Station zu beseitigen und um hierdurch die Gefahr der Beschädigung und des

Verschmutzens der Schneiden und der Lager zu verringern, müssen bei den Meßreisen die Pendel auch während des Transportes selbst im evakuierten Pendelapparat bleiben können. Bei der gedrungenen Stabform können die Pendel (P) für eine zusätzliche Transportarretierung (A) einen ziemlich großen Druck in ihrer Längsachse

sorgt. Aus Gründen der Konstanz wird eine Aufsetzgenauigkeit von unter $\frac{1}{1000}$ mm verlangt. Da das Vakuum auch über längere Meßzeiten erhalten bleiben soll, sind möglichst wenig Durchführungen am Apparat selbst. Die Haube (H) besitzt nur ein Fenster (F) für die Lichtzeiger und zum Ablesen des Thermometers (T), Manometers, Feuchtigkeitsmessers (Fl) und der Niveaus (Li). Die Grundplatte mit Trägergerüst hat zwei Hähne – ein Stück genügte bereits – und eine durchgehende Kurbel (G). Dieser Antrieb (G) besorgt nacheinander und selbsttätig das Abheben der Pendel vom Lager, das Spannen der Amplitudengeber (Pe) und das Lagern für den Transport, ebenso in rückwärtiger Reihenfolge. Das Auslösen der Pendelbewegung – einzeln, paarweise oder alle zusammen, mit ganzer (25') oder halber Amplitude – geschieht über eine Schaltrosette (J) durch Elektromagnete (F). Die Haube ist – Gummiunterlagen haben sich bei uns bisher nicht gut bewährt – mit einem Fettschliff aufgesetzt. Die Niveaus sind auf der Lagerplatte im Innern angebracht. Jedes Pendel besitzt Planspiegel und je eine gut korrigierte Linse mit entsprechendem Prismensatz, so daß von einer Lampe die vier Lichtzeiger in 172 cm Entfernung nebeneinander scharf registriert werden.

Die Bedienung des Pendelapparates erfolgt lediglich durch den Antrieb (G) und den elektrischen Schalter (J). Die Transport- und Vakuumsicherheit hat sich auf Reisen über 10000 km gut bewährt. Auch die Justierung der Optik hält sich hinreichend. Wesentliche Schwierigkeiten bereitete im Anfang, den Pendelapparat so staubfrei zusammenzusetzen, daß nicht im Laufe der Zeit Staubteilchen unter die Schneide zu liegen kommen. Durch Öffnen und Reinigen des Lagers ließ sich dieser Schaden beheben und die „herausgefallenen“ Schwingungsdauern der Pendel zeigten wieder ihren alten Wert. Als etwas unbequem erwies sich ferner bei Orts- und erheblicherem Temperaturwechsel besonders im Winter ein mehrstündiges Stehenlassen, um einen Temperatureausgleich in dem evakuierten Pendelapparat herbeizuführen. Im Verhältnis zu den sonstigen Vorteilen jedoch kann man diese Zeitspanne auch mit Rücksicht auf die anderweitigen Meßarbeiten bequem mit in Kauf nehmen.

Der Pendelapparat wird auf eine niedrige Betonplatte (Be), die ihrerseits mit ihren drei Füßen angekipst wird, in drei vorgesehene Nuten für die Fußschrauben aufgesetzt. Diese geringe Erhöhung ist mit Rücksicht auf den Lichtschreiber notwendig. Das Mitschwingen (γ) beträgt bei einigermaßen gutem Zementfußboden unter $10 \cdot 10^{-7}$ sec.

2. Das Registriergerät.

Bei dem Schwingungsdauerverfahren hat das Registriergerät (Abb. 3) die Aufgabe, zu Anfang und Ende der Beobachtungszeit die Nulldurchgänge der Pendelschwingungen mit einer Zeitgenauigkeit von $\frac{1}{2000}$ sec

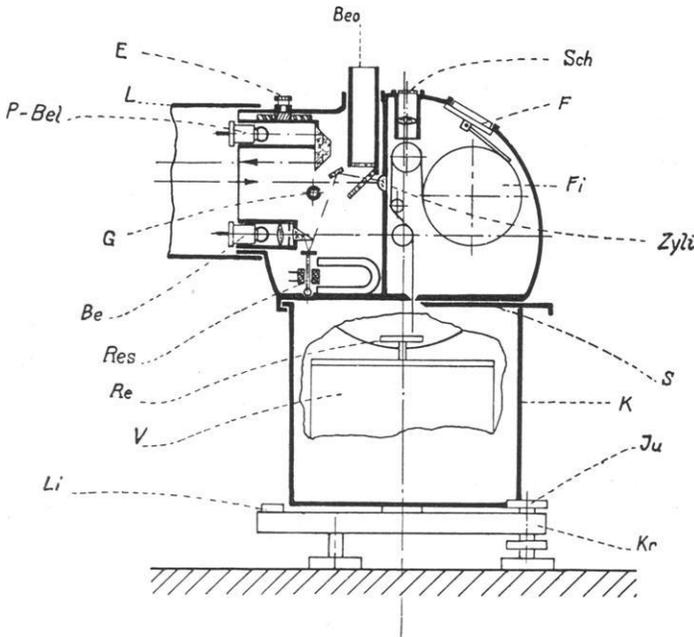


Abb. 3. Schema des Registriergeräts.

Sch Schreibeinrichtung, F Filmzähler, Fi Filmspule, Zyli Zylinderlinse, S Messer zum Abschneiden des Films, K Kassette für belichteten Film, Kr Kreuzschlitten, Ju Fußschrauben, Li Niveau, V Vierfederuhrwerk, Re Reibradgetriebe, Res Resonanzrelais, Be Beleuchtung für das Resonanzrelais, P-Bel Beleuchtung für die Pendel, G Glimmrohr, E Scharfeinstellung für die Lichtzeiger, Beo Beobachtungsfenster, L Lichtschutzrohr.

auf die drahtlosen Uhrzeichen zu beziehen (wie bei einer Stoppuhr). Die Papierfilmgeschwindigkeit beträgt 10 cm/sec und muß so gleichmäßig sein, daß $\frac{1}{20}$ mm mit Sicherheit noch bestimmt werden kann. Der gleichmäßige Papierlauf wird durch eine eingebaute Schwungmasse erzielt, die gleichzeitig als Reibradübersetzung (Re) zur Einstellung der Geschwindigkeit von 4–15 cm/sec ausgebildet ist. Für die Interpolation zwischen den (drahtlosen) Zeitmarken und den durch Blenden

den Pendelkurven eingedruckten Nullmarken werden „Stimmgabelzeitmarken“ in der von uns stets benutzten Art über ein Geißler- oder Glimmrohr gleichzeitig mit photographisch geschrieben (s. Abb. 4). Die Konstanz der Stimmgabelzeitmarken beträgt während der Messung selbst $0,1\%$ ¹⁾, sie lassen sich unter 1% auf die Frequenz 50 Hz abstimmen²⁾. Hochfrequenzstörungen beim gleichzeitigen drahtlosen

¹⁾ Angabe H. MARTIN (3) § 6, mittels Koinzidenzverfahren gemessen.

²⁾ Die Stimmgabeln (2) besitzen zwei Kontakte (K), einer betätigt die Selbsterrregung (E), der andere unterbricht den Primärstrom eines Induktors (I), der ein

Empfang lassen sich bei einem Glimmrohr so gering halten, daß ein Sender von $\frac{1}{2}$ kW auf ca. 1000 m Welle in 1000 km Entfernung noch einwandfrei empfangen werden kann, wesentlich unangenehmer dagegen sind eng benachbarte oder gleichwellige Sender.

Die weitere wesentliche Einrichtung im Registriergerät ist das „Resonanzrelais“ (Res). Es dient zum Aufzeichnen der drahtlos empfangenen Uhrzeichen. Es besteht aus einem Lautsprechersystem, dessen Bewegung durch einen Lichtzeiger aufgeschrieben wird. Hält man das logarithmische Dekrement durch Konstruktion und durch Schaltung klein ($A < 0,1$), so erhöht die mechanische Resonanz beim Überlagerungsempfang von Signalen recht erheblich die Selektivität des Empfängers und man kann so mit diesem einfachen Mittel die Empfindlichkeit des Systems steigern und die benachbarten Störsender betriebssicher ausschalten. Die Einsetzgenauigkeiten der aufgezeichneten Zeitmarken liegen unter $\frac{1}{2000}$ sec bei hinreichender Amplitude über dem Störspiegel.

Selbstverständlich besitzt das Registriergerät eine kurzbrennweitige Zylinderlinse (Zyli) für eine hinreichend scharfe Aufzeichnung. Um das Gerät in der Höhe und in den Seiten bequem zu justieren, steht es auf einem Kreuzschlitten (Kr) mit sehr langen Fußschrauben (Ju). Die Beleuchtung (Be bzw. P-Bel) der Lichtzeiger erfolgt mit je einer 3,5-Volt-Einfadenlampe für die vier Pendel und das Resonanzrelais. Die Lichtzeiger können auch während der Registrierung gleichzeitig auf einer Mattscheibe beobachtet (Beo) werden. Die Justierung der Aufstellung: Pendelapparat und Registriergerät erfolgt selbständig durch die Scharfeinstellung der Lichtzeiger und bietet bei annähernd richtiger Entfernung beider Geräte, selbst im hellen Raum, keine Schwierigkeiten. Zur Vermeidung von Nebenlicht genügt es, ca. 30 cm lange Papprohre auf die Lichteintrittsstellen (L) zu stülpen. Daneben weist das Gerät verschiedene zusätzliche Einrichtungen auf, die das Arbeiten technisch sehr erleichtern.

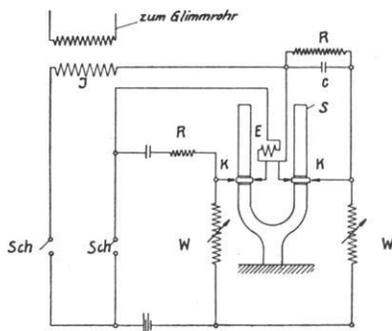


Abb. 4. Schema des Stimmgabelzeitmarkierers.

E Erregerspule, W Widerstand (veränderlich), R Widerstand (fest), C Kapazität, I Induktor, S Stimmgabel, K Stimmgabelkontakt, Sch Schalter.

Glimmrohr speist. Als Stromquelle dient ein einziger 4-Volt-Akku. Die Dauer der Zeitmarken (Aufleuchten des Geißlerrohres) beträgt unter $\frac{1}{2000}$ sec.

3. Die Quarzglaspendel.

Die Quarzglaspendel besitzen im Gegensatz zu denen aus Eisen-nickellegierungen außer einem weit kleineren Temperaturkoeffizienten keine magnetische Korrektur¹⁾. Sie eignen sich deshalb auch besonders für Anschlüsse über weite Strecken. Das Quarzglas hat den weiteren Vorteil, daß die Pendel infolge der Homogenität des Materials sich auch dem Auge sichtbar gleichmäßig herstellen lassen, so daß die einzelnen Konstanten gleich groß ausfallen. In einer früheren Arbeit (1) habe ich von 8 verschiedenen Pendeln das spezifische Gewicht angegeben, das weniger als $1^0/_{00}$ schwankt.

Als Form wurde die Stabform (Abb. 5) gewählt. Die von SCHULER betonte Minimumbedingung wurde mit eingehalten, obwohl dadurch in

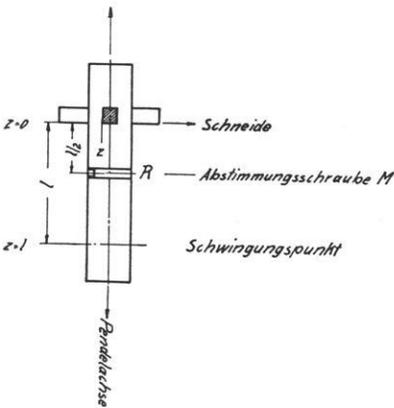


Abb. 5.

Schema des Quarzglaspendels.

der Besselschneidenkorrektur eine Inkonstanz des Krümmungsradius etwas vergrößert eingeht (6), die aber in Betracht der Stabform ohnehin zum Teil mit in Kauf genommen werden mußte. Man kann somit bei einer Inkonstanz der Pendel eine geringfügige Verlagerung des Schneidenkörpers – er ist eingeschliffen und eingekittet – keinesfalls mehr für die Schwingungsdaueränderung verantwortlich machen. Die Wahl der Form und die Größe der Dimensionen ist bereits früher im einzelnen angegeben worden (2).

Die Pendel besitzen je zwei Spiegel aus Sicherheitsgründen. Bei den hier benutzten Pendeln sind die hinterflächenversilberten Spiegel eingeschliffen, während bei anderen Pendeln sich der Spiegel auch oberflächenversilbert direkt am Pendelkörper anschleifen läßt. Die Legierung des Spiegelmetalles ist besonders korrosionsbeständig und reflektiert auch noch nach längerer Zeit einen hohen Prozentsatz ($90^0/_{0}$) des auffallenden Lichtes.

Die Dimensionen der Quarzglaspendel sind schon mit Rücksicht auf die Transportarretierung fest vorgegeben. Um trotzdem eine Abstimmung

¹⁾ Bestimmung der magnetischen Korrektur aus Schwingungsdauerbeobachtungen an unseren Sterneck-Halbsekundenpendeln aus Indilatans s. H. MARTIN (3) § 8; man hat für 2000γ eine Korr. von $1 \cdot 10^{-7}$ sec zu erwarten, falls das magnetische Moment des Pendels konstant bliebe (!). Andere Beobachtungen bei RÖSSIGER (4), Verringerung dieses Einflusses durch einen „Mum“-metallgehäuseüberzug bei BULLARD (5).

möglichkeit für die Unregelmäßigkeiten, die durch die Toleranzen und die verschiedenen Größen der Schneidenradien (Besselkorrektion) bedingt werden, noch zu besitzen, war bereits früher (2) eine Abstimm- schraube in einer Ebene senkrecht zur Pendelachse und im Abstand der halben reduzierten Pendellänge vom Verfasser benutzt worden. Be- kanntlich¹⁾ bewirkt eine Zusatzmasse dm im Abstand $l/2$ (nach dem Schwingungspunkt [1] zu gerechnet) von der Schneide eine maximale Schwingungsdaueränderung von

$$\Delta T_m = \frac{dm}{8jM}, \quad (1)$$

wobei M die Pendelmasse (ohne dm) und j einen Zahlenfaktor ($j = \frac{\text{Schwerpunktsabstand}}{\text{reduzierte Pendellänge}} = \frac{s}{l}$) bedeutet. Entfernt man sich jedoch um den Betrag Δz von dem Punkt $R \left(z = \frac{l}{2} \right)$, so wird²⁾

$$\Delta T_{\Delta z} - \Delta T_m = -4 \left(\frac{\Delta z}{l} \right)^2 \cdot \Delta T_m. \quad (2)$$

Die Abstimm- schraube in R kann je nachdem die Masse zu- oder abnimmt, die Halbschwingung des Pendels verkürzen oder verlängern. Ehe auf Zahlenwerte eingegangen wird, ist noch zu untersuchen, welchen Effekt ein schlechtes Passen des Abstimmungs- zylinders (Wackeln) in Richtung der Pendelachse hervorruft. Nimmt man an, daß der Zylinder R sich um ∂z längs der Achse bewegen kann, dann ist die Änderung in der Halbschwingung

$$\partial [\Delta T_{\Delta z} - \Delta T_m] = -8 \frac{\Delta z}{l} \cdot \frac{\partial z}{l} \cdot \Delta T_m. \quad (3)$$

In Abb. 6 ist für verschiedene Werte von Δz (falsche Lage der Schraube zum Punkt R , $z = l/2$) unter der Annahme eines „Wackelns“ von ∂z ($1/5$, $1/10$, $1/20$ mm) die entsprechende Änderung in der Pendelhalb- schwingung aufgetragen. Für unsere Pendel ist $1/10 < \Delta z < 2$ mm und selbst durch $\partial z = 0,05$ mm ist mithin keine maximale Änderung über $0,1$ mgal bei den einzelnen Pendeln im ungünstigsten Falle zu erwarten³⁾. Die Wirkung der Abstimm- schraube von etwa 5 g^4 zeigt folgende Tafel 1, wo die ersten Werte (ohne Schraube) die Regelmäßigkeit zeigen, mit der man solche Pendel für gewöhnlich herstellen kann. Die maxi-

¹⁾ MEISSER (2) § 4 und § 5.

²⁾ Siehe MEISSER (2) die strenge Formel (16a) für dm in der Entfernung z .

³⁾ Die Ausführung der Schrauben ist so, daß ∂z kaum $1/100$ mm betragen kann.

⁴⁾ Das Gewicht von 5 g wurde gewählt, um noch einige Einheiten der 4. Dezimale unter Umständen beherrschen zu können.

Tafel 1¹⁾.

Pendel Nr.	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q 10
Halbschw. ohne Schraube sec . . .	0,408 368 ₆	...374 ₁	...400 ₇	...391 ₄	...414 ₂	...397 ₅	...404 ₈	...393 ₃
Halbschw. mit Schraube sec	0,407 628 ₉	...581 ₉	...589 ₆	...622 ₆	...617 ₉	...623 ₆	...630 ₄	...625 ₈
Gewicht der Schraube g	4,888	5,181	5,308	5,028	5,205	5,058	5,054	5,023
Halbschw.-Änderung 10 ⁻⁴ sec	7,39 ₇	7,92 ₂	8,11 ₁	7,68 ₈	7,96 ₃	7,73 ₉	7,74 ₄	7,67 ₅
für 1 g Schraubengew. 10 ⁻⁴ sec.	1,52 ₉	1,52 ₉	1,52 ₈	1,53 ₁	1,52 ₉	1,52 ₄	1,53 ₂	1,52 ₈

malen Abweichungen betragen $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ sec, diese Größe muß von der Grobabstimmung noch sicher zu erfassen sein. Die 8 Pendel wurden gleichzeitig unter denselben Bedingungen bis auf die $\frac{1}{2}$ sechste Dezimale in zwei Apparaten beobachtet. Bei der zweiten Meßreihe wurden die Schrauben mit den angegebenen Gewichten eingesetzt. Die letzte Reihe mit der Halbschwingungsänderung für 1 g Schraubengewicht im Mittel von $1,52_9 \cdot 10^{-4}$ sec mit einem maximalen Fehler

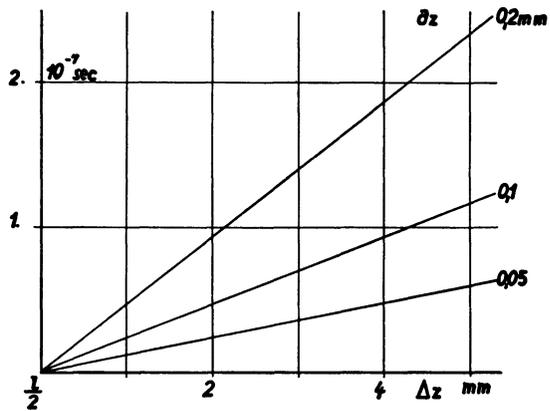


Abb. 6.

von $\pm 4 \cdot 10^{-7}$ (Auswertfehler $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ sec!) zeigt, daß die Theorie der Abstimmung außerordentlich gut bestätigt und ihre bequeme Handhabung somit gesichert ist.

Die Konstanz der Pendel zeigte bereits im Laboratorium eine weitgehende Abhängigkeit vom Schneidenmaterial, da durch die Minimumbedingung und die Verwendung von Quarzglas die „üblichen“ Erklärungsversuche über Dimensionsänderungen ausgeschaltet waren. Eingehende Untersuchungen (1) führten schließlich zu Stahlschneiden. Treten einmal bei einem Pendel infolge Beschädigung der Schneide auch kleinere dauernde Unsicherheiten auf, so gibt es

¹⁾ 4. VII. 1935 neue Schneiden eingesetzt. Gemessen HOHMANN.

nur ein experimentell einwandfreies Hilfsmittel: man muß die Schneiden neu schleifen lassen. Als Lagermaterial bewährten sich Achat und Stahl gleichermaßen. Weitere Untersuchungen an kippbaren Pendellagern sind noch nicht voll abgeschlossen.

4. Die Korrekturen der Pendelschwingungsdauern.

a) **Temperaturkorrektion.** Bezeichnet β den linearen Wärmeausdehnungskoeffizient des Pendelmaterials, dann beträgt bekanntlich die Temperaturkorrektion der Halbschwingung T für die Temperaturzunahme von 1°

$$\Delta T^\circ = -\frac{\beta}{2} \cdot T. \quad (4)$$

Für gutes Quarzglas hat man in unseren Temperaturbereichen den Durchschnittswert von β cr. $5 \cdot 10^{-7}$, mithin beträgt der rechnerische Wert von $\Delta T^\circ = 1,0 \cdot 10^{-7}$ sec (für $T = 1/2,5$ sec). Die experimentelle Bestimmung ergab bei der Prüfung den Wert $\Delta T^\circ = -1,04 \pm 0,04 \cdot 10^{-7}$ sec¹⁾. Da bei unseren Messungen stets ein mittleres Temperaturintervall, für dessen Grenzen ΔT° sich jeweils leicht nachprüfen läßt, für die relative Reduktion zugrunde gelegt wird, so kann man für die Umrechnung ($< \pm 5^\circ$) mit der einfachen Annahme rechnen: einem Grad Temperaturänderung entspricht eine Halbschwingungsdaueränderung von einer Einheit in der 7. Dezimale ($1/2$ mgal). Besonders zu beachten ist mit Rücksicht auf das Vakuum beim Transport, daß bei größeren Temperaturdifferenzen an einem neuen Beobachtungsort stets eine entsprechende Zeit gewartet werden muß, bis der Ausgleich mit der Umgebungstemperatur eingetreten ist.

Da auch hier, wie bei jeder Korrektion, das Ziel ist, die Temperaturkorrektion völlig zu beseitigen, wird noch ein Zweikörperstabpendel mit einer Wolframeinlage entwickelt. Der Temperaturkoeffizient soll 0 ($< 1 \cdot 10^{-8}$ sec) betragen. Die experimentelle Prüfung ist noch nicht ganz abgeschlossen (11).

b) **Luftdichtekorrektion.** Der Luftdichtekoeffizient von Quarzglaspendeln ist wegen des geringen spezifischen Gewichtes des Quarzes (2,2) wesentlich größer als derjenige von Eisennickelpendeln. Aus diesem Grunde muß für den Druck eine Ablesegenauigkeit von $1/20$ mm Hg gefordert werden. Das Manometer besteht aus einem Rohr mit Zwischenwand (7), so daß die Quecksilberkuppen hintereinander erscheinen, die Ablesung wird mit einem verkürzten Höhen-Kathetometer vorge-

¹⁾ Temperaturintervall $13,2^\circ$ C, Messung: 4. und 8. I. 1935.

nommen ($\pm 1/50$ mm). Um auch hier die „Druckkorrektion“ zu vermeiden bzw. fast unwirksam zu machen, wird stets bei derselben mittleren Luftdichte beobachtet. Die Bestimmungen von Apparat 807 ergeben für den Druck bei konstanter Feuchtigkeit (80⁰/₀) und Temperatur (18°) folgende Druck(p)abhängigkeit für die mittlere Halbschwingung

$$T_p = T_{p=0} + 2,769 p \cdot 10^{-7} + \sqrt{p} 11,8_6 \cdot 10^{-7} \text{ sec.}^1) \quad (5)$$

Praktisch jedoch wurde immer nur in einem festen Druckintervall bei auch über längere Meßzeiträume konstanter relativer Luftdichte d²)

$$d = \frac{p - \frac{2}{3} e}{760 (1 + 0,003 66_5 t^\circ)} = \frac{p'}{760 (1 + 0,003 66_5 t^\circ)} \quad (6)$$

gearbeitet. Für den Bereich von 5–12 mm (p) wurde experimentell eine lineare Druckkorrektion von $\frac{4,6 \cdot 10^{-7} \text{ sec}}{\text{mm Hg}}$ gefunden. Die Feuchtigkeitskonstanz wurde an einem eingebauten Haarhygrometer abgelesen und an der Temperaturabhängigkeit der Quecksilberablesung (p) kontrolliert. In Abb. 7 ist der Wert p' (b) und die zugehörige Temperatur t° (a) für verschiedene Meßreisen angegeben. Der Apparat wurde nicht geöffnet. Wie der Verlauf zeigt, bleibt das Vakuum über längere Zeiträume recht konstant und die Korrektion für die relative Luftdichtekorrektion (p') ist gleichermaßen nur sehr gering. Die unregelmäßigen kleinen Schwankungen dürften von der Inkonstanz der Kapillardepression herrühren.

Trotzdem ist es zu begrüßen, wenn durch die Wolframeinlage an den temperaturkompensierten Pendeln die Luftdichtekorrektion noch etwas geringer wird.

c) **Amplitudenkorrektion.** Bereits von MARTIN (3) war festgestellt worden, daß durch die Gestalt der Schneide (Krümmungsradius in Abhängigkeit vom Ausschlagswinkel) eine Abweichung der Amplitudenkorrektion von ihrer üblichen theoretischen Form festzustellen ist. Eingehende Untersuchungen³⁾ zeigten, daß bei Stahlschneiden diese „zusätzliche Amplitudenkorrektion“ unter $1/2$ mgal maximal bleibt. Wird stets bei genau derselben Anfangsamplitude, demselben Druck und über denselben Zeitraum gependelt, so ist die evtl. Unsicherheit der theoretischen Korrektion auf eine mittlere Amplitude φ_m zu vernach-

1) Beobachtet 17. V. 1935.

2) e Druck des Wasserdampfes, t° Temperatur.

3) MEISSER (6).

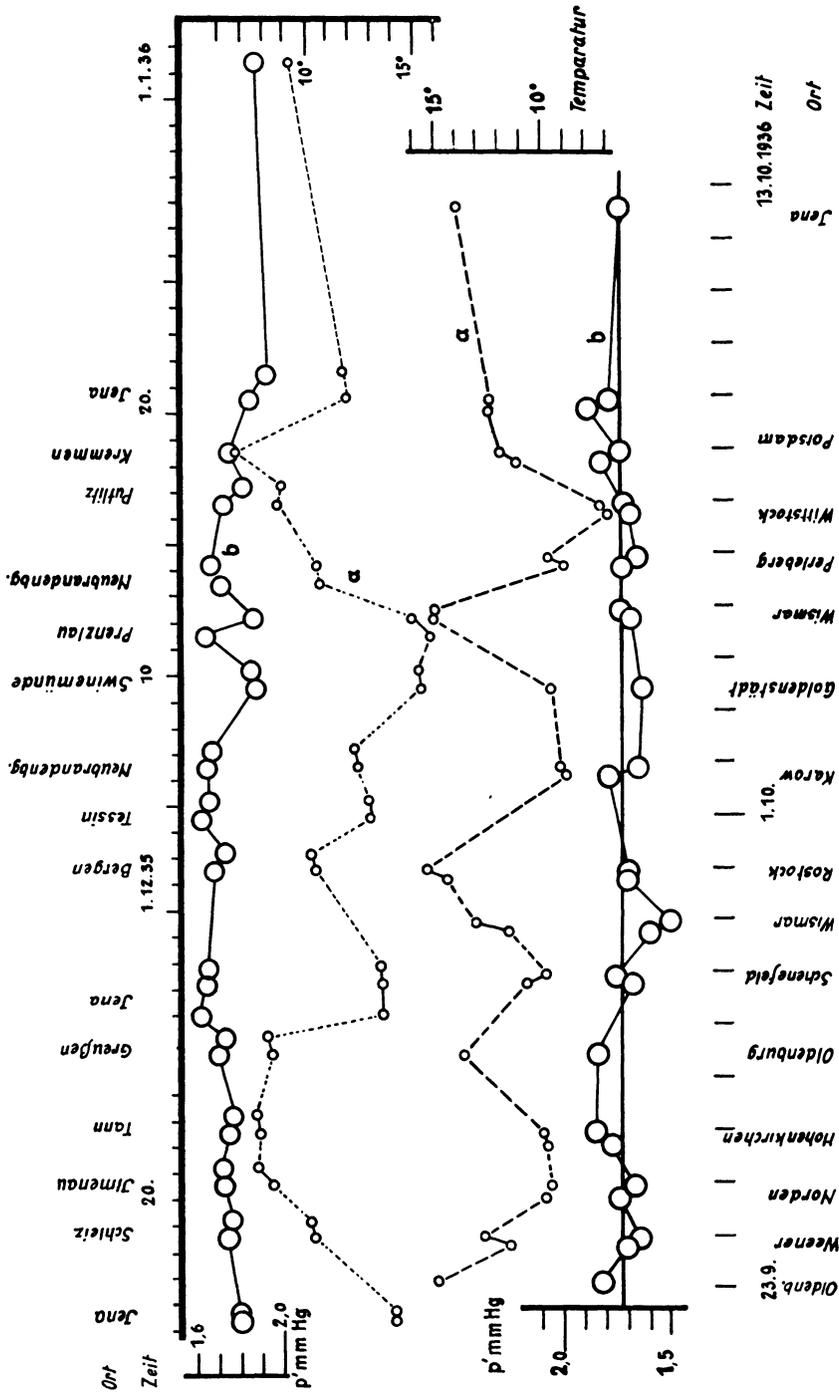


Abb. 7. Druckkonstanz des Pendelapparates während verschiedener Meßreisen.

lässigen¹⁾. Bei unseren Messungen wurde immer auf die Amplitude 0 reduziert, um keine Vorzeichenfehler bei ungeübten Hilfskräften auftreten zu lassen. In Abb. 8 ist für $T \sim 0,407_6$ sec die übliche Amplitudenkorrektion²⁾ ΔT_φ für eine mittlere Amplitude φ_m wiedergegeben, wie sie für Stations- und Mitschwingbeobachtungen Verwendung findet. Die experimentellen Abweichungen der mittleren Pendel (Mittel aus je vier gleichzeitig schwingenden Pendeln) von der theoretischen Amplituden-Korrektion waren zu vernachlässigen. Die Beobachtungszeit wurde zu zwei Stunden gewählt. Das logarithmische Dekrement der Pendel beträgt $\lambda < 10^{-4}$ (8).

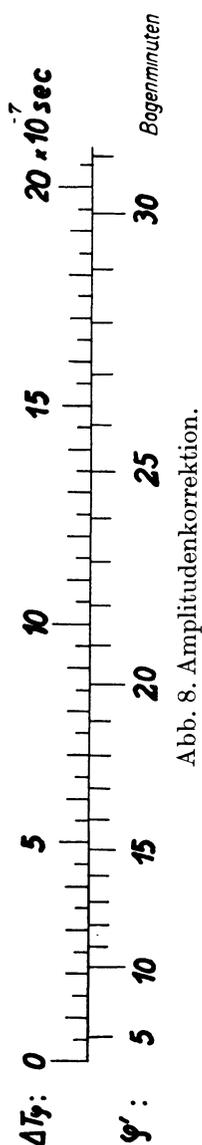


Abb. 8. Amplitudenkorrektion.

d) **Mitschwingkorrektion.** Da bei dem beschriebenen Pendelapparat alle zusätzlichen Durchführungen für Amplitudeneinstellung zugunsten einer erhöhten Vakuumsicherheit vermieden worden sind, muß für das Bestimmen des Mitschwingfaktors γ auf das übliche Amplitudenbeobachtungsverfahren³⁾ verzichtet werden. Um auch die Schwierigkeiten zu beseitigen, ein Pendel hängend völlig zu beruhigen, wurde ein anderes Verfahren gewählt: γ wird aus der Halbschwingungsdauerdifferenz zweier in derselben Ebene gegeneinander schwingender Pendel (1,2) bestimmt, wenn sie mit verschiedenen Amplituden (a_i) losgelassen werden. Für gewöhnlich schwingen die beiden gleichen⁴⁾ Pendel 1 und 2 in derselben Ebene, mit gleichen Anfangsamplituden (a_1, a_2) und einer Phasenverschiebung $\nu_{12} = 180^\circ$. Die momentanen Halbschwingungsdauern T_{1m} sind nach FURTWÄNGLER (9 und 10):

$$T_{1m} = T_{10} + \gamma \left(1 + \frac{a_2}{a_1} \cos \nu_{12} \right), \quad (7)$$

1) Beispiel: Mittleres Pendel aus Q 3, Q 4, Q 5, Q 6. Auswertgenauigkeit $\pm 1,3 \cdot 10^{-7}$ sec 15./16. V. 33.:

Amplitude φ_m :	26,3'	22,8'	20,0'	17,6'	15,3'
theoretisch korr. T:	...70,1	...70,5	...70,4	...72,0	...71,7

in Einheiten der 7. Dezimale sec.

2) $T \cdot \varphi_m^2 / 16$.

3) Ein Pendel schwingt und „treibt“ ein in derselben Ebene vorerst beruhigtes Pendel (9).

4) Hinsichtlich der Größen T_i, M_i, s_i .

$$T_{2m} = T_{20} + \gamma \left(1 + \frac{a_1}{a_2} \cos \nu_{12} \right), \quad (8)$$

wobei die einzelnen Pendeldekremente nicht gleich zu sein brauchen. Führt man die entsprechenden Mittelwerte ein, die sich aus den Beobachtungen zu Anfang (\mathfrak{A}) und zu Ende (\mathfrak{E}) der Beobachtungszeit ergeben, dann wird unter Berücksichtigung der mittleren Amplituden

$$\varphi_{1m} \text{ und } \varphi_{2m}^1) \text{ und } T_m = \frac{1}{2} (T_1 + T_2)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{T_{1m} - T_{2m} - (T_{10} - T_{20}) - \frac{T_m}{16} (\varphi_{1m}^2 - \varphi_{2m}^2)}{\frac{\left(\frac{a_2}{a_1} \cos \nu_{12} \right)_{\mathfrak{A}} + \left(\frac{a_2}{a_1} \cos \nu_{12} \right)_{\mathfrak{E}}}{2} - \frac{\left(\frac{a_1}{a_2} \cos \nu_{12} \right)_{\mathfrak{A}} + \left(\frac{a_1}{a_2} \cos \nu_{12} \right)_{\mathfrak{E}}}{2}} \\ &= \frac{2 \left[T_{1m} - T_{2m} - (T_{10} - T_{20}) - \frac{T_m}{16} (\varphi_{1m}^2 - \varphi_{2m}^2) \right]}{\left[\left(\frac{a_2}{a_1} - \frac{a_1}{a_2} \right) \cos \nu_{12} \right]_{\mathfrak{A}} + \left[\left(\frac{a_2}{a_1} - \frac{a_1}{a_2} \right) \cos \nu_{12} \right]_{\mathfrak{E}}}. \end{aligned} \right\} (9)$$

Die Amplituden werden praktisch $a_{2\mathfrak{A}} \sim 25'$ und $a_{1\mathfrak{A}} \sim 12,5'$ gewählt. Ohne Amplitudenkorrektion erhält man dann für $\nu_{12} = 180^\circ$ annähernd

$$T_{1m} - T_{2m} \sim \frac{3}{2} \gamma. \quad (10)$$

Die Bestimmung von γ braucht nur ungefähr zu sein (einige 10⁰/₀), da ja durch Einhalten der guten Pendelabstimmung, der Phasendifferenz $\nu_{12} \approx 180^\circ$ und durch eine einwandfreie gleichzeitige elektromagnetische Auslösung von $< 1/200$ sec sich der Einfluß des Mitschwingens fast heraushebt, es ist für das „mittlere Pendel“

$$\left. \begin{aligned} T_m &= \frac{T_{1m} + T_{2m}}{2} \\ &= \frac{T_{10} + T_{20}}{2} + \gamma \left\{ 1 + \frac{\left[\left(\frac{a_2}{a_1} + \frac{a_1}{a_2} \right) \cos \nu_{12} \right]_{\mathfrak{A}} + \left[\left(\frac{a_2}{a_1} + \frac{a_1}{a_2} \right) \cos \nu_{12} \right]_{\mathfrak{E}}}{4} \right\} \end{aligned} \right\} (11)$$

oder da $\frac{a_1}{a_2} = 1 \pm \varepsilon$ und $\frac{a_2}{a_1} = 1 \mp \varepsilon$, wobei $\varepsilon \ll 1$ ist, hat man

$$T_m \approx \frac{T_{10} + T_{20}}{2} + \gamma \left\{ 1 + \frac{(\cos \nu_{12})_{\mathfrak{A}} + (\cos \nu_{12})_{\mathfrak{E}}}{2} \right\}. \quad (12)$$

¹⁾ $\varphi_{mi} = (a_{i\mathfrak{A}} + a_{i\mathfrak{E}})/2$.

Da $\nu_{12} \approx 180^\circ$, braucht man nur den Unterschied der entsprechenden $\cos \nu_{12}$ gegen 1 mit γ zu multiplizieren und erhält so als Mitschwingkorrektion

$$\Delta T_\gamma = -\gamma \left\{ 1 + \frac{(\cos \nu_{12})_{\mathfrak{A}} + (\cos \nu_{12})_{\mathfrak{B}}}{2} \right\}. \quad (13)$$

Die beschriebene Methode liefert eine hinreichende Genauigkeit trotz der nur halben Amplitude für das eine Pendel. Vollständig eliminiert sind dabei Uhr, Druck- und Temperaturkorrektion. Die Beobachtung kann mit einer Taschenuhr vorgenommen werden. Es sind nur Stimmgabelzeitmarken erforderlich, um die relativen Schwingungsdauerdifferenzen auf ein Pendel zu beziehen. Für ein feststehendes Beobachtungsintervall (ca. 30 Min.) kann man sich sehr bequeme Auswertanordnungen schaffen.

Der Mitschwingfaktor γ hängt von der Pendelmasse M , der Stabilität des Apparates und der Aufstellung ε^1) ab:

$$\gamma = \frac{\pi \sqrt{g}}{2} \cdot \frac{M}{\varepsilon} \sqrt{\frac{s}{1 + \left(\frac{q}{s}\right)^2}}. \quad (14)$$

Im wesentlichen ist ε und M bestimmend. Für mathematische Pendel und Minimalpendel besteht in γ wegen des Abstandes Schwerpunkt-Schneide der Unterschiedsfaktor 2.

Die praktische Nachprüfung mußte zunächst die Unabhängigkeit der Pendelpaare bei vier gleichzeitig schwingenden Pendeln erweisen, d. h. es sind keine schädlichen Luftkoppelungen vorhanden. Die Differenzen $T_3 - T_4$ und $T_5 - T_6$ ergaben sich gleich zu

$$\left. \begin{array}{l} T_3 - T_4: 13,9 \cdot 10^{-7} \text{ sec} \\ T_5 - T_6: 53,8 \cdot 10^{-7} \text{ sec} \end{array} \right\} \pm 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$$

sowohl wenn alle vier Pendel gleichzeitig schwingen, als auch wenn die beiden Pendelpaare 3, 4 und 5, 6 nacheinander beobachtet wurden²⁾.

Bei im Abstand von 20 Min. aufeinanderfolgenden Messungen während einer zweistündigen Beobachtungszeit ergab sich das Verhältnis der Amplituden eines Pendelpaares (i, k) $\frac{a_i}{a_k} = q_{ik}$ als fast konstant (Beispiel $q_{43}: 1,02_{\mathfrak{A}} \dots 1,04_{\mathfrak{B}}$; $q_{65}: 1,02_{\mathfrak{A}} \dots 1,04_{\mathfrak{B}}$). Die Phasenverschiebung

¹⁾ ε ist der Horizontalzug für die Verschiebung 1.

²⁾ 2. X. 33 Druck ca. 10 mm Hg. Es wurde absichtlich eine wenig gute Abstimmung gewählt, um evtl. Abweichungen stärker hervortreten zu lassen.

ν_{ik} ist eine lineare Beziehung der Beobachtungszeit $t^1)$, man hat näherungsweise

$$\frac{d\nu_{ik}}{dt} \sim 2(T_i - T_k), \quad (15)$$

wie folgendes Beispiel in Tafel 2 auch zeigt²⁾:

Tafel 2³⁾.

Beobach- achtungszeit	0...20 Min.	...40 Min.	...60Min.	...80 Min.	...100 Min.	...120 Min.
ν_{43} sec	+ 0,019	0,013	0,009	0,003	- 0,001	- 0,006
ν_{65} sec	+ 0,007	- 0,009	- 0,023	- 0,038	- 0,052	- 0,067
q_{43}	1,018	1,033	1,040	1,031	1,041	-
q_{65}	1,017	1,021	1,027	1,033	1,042	-

Dieses experimentelle Beispiel zeigt, daß die vereinfachten Beziehungen bei guter Abstimmung hier auch ohne Bedenken für das zwei-stündige Beobachtungsintervall angewendet werden können.

Die Beobachtungen auf gutem Zementboden ergeben für die Quarzglaspendel ein γ von ca. $5...10 \cdot 10^{-7}$ sec, ein Wert, der für diese Apparatekonstruktion günstig zu nennen ist und eine weitgehende Benutzung der Formel (13) erlaubt.

Bei dieser Zweipendelmethode der Beobachtung der Schwere wie des Mitschwingens geht die horizontale Bodenbewegungskomponente in die Differenz der $T_i - T_k$ zweier gegeneinander schwingender Pendel (i, k) voll ein, wie bereits VENING-MEINESZ (10) gezeigt hat. An derselben Stelle wurde gezeigt, daß eine hinreichend große Beobachtungszeit diesen Einfluß verkleinert. Bei Meßorten an der Nordseeküste konnte deutlich beobachtet werden, wie die Pendelpaare in sich mit der Beobachtungszeit auseinander liefen. Bei nicht zu starker Bodenbewegung muß jedoch das mittlere Pendel $\frac{1}{2}(T_i + T_k)$ den richtigen Wert ergeben. Es ist nicht einwandfrei, die einzelne Differenz nur eines Pendelpaares ($T_i - T_k$) als Kriterium für die Konstanz der beiden Pendel zugrunde zu legen, sondern man darf nur als völlig gesicherte Angabe die Differenzen von zugehörigen Pendelpaaren benutzen. Folgende Beispiele zeigen dies: Es sind die Differenzen derselben Pendel an verschiedenen, weit auseinanderliegenden Stationen gegeben, man kann so ohne Reduktion der Uhr, der Temperatur, der Luftdichte und des

1) Nach (5) Gleichung 300 ist $\frac{d\nu_{12}}{dt} = \frac{\mu(q_{12}^2 - 1)}{q_{12}} + 2\delta T$.

2) X. 33.

3) Gemessen HOHMANN.

Mitschwingens sofort aus den Differenzen der beiden Pendelpaare (unterstrichen) eine Aussage über die Konstanz der Pendel in sich machen:

Tafel 3¹⁾.

Q_i	$T_{i_{12. XI. 23}} - T_{i_{5. XI. 34}}$	$T_{i_{13. XI. 34}} - T_{i_{12. XI. 34}}$	$T_{i_{14. XI. 34}} - T_{i_{5. XI. 34}}$
Q_7	$103,5 \cdot 10^{-7}$	$188,2$	$58,7$
Q_8	$100,8$	$204,2$	$74,9$
	} <u>102,2</u>	} <u>196,2</u>	} <u>66,8</u>
Q_9	$101,6$	$190,1$	$62,7$
Q_{10}	$101,1$	$202,3$	$68,2$
	} <u>101,4</u>	} <u>196,2</u>	} <u>65,5</u>
	$\Delta = 0,8$	$\Delta = 0,0$	$\Delta = 1,3 \cdot 10^{-7}$

Aus den Zahlen (in Einheiten der 7. Dezimale für T_i) kann man bereits ohne jede Korrektur eine Konstanz von $1/2$ mgal sehen. Denn das Ziel einer experimentellen Beobachtung ist, bereits aus den Meßwerten selbst ohne schwierige Korrekturen den Genauigkeitsgrad zu ersehen.

Der Einfluß der horizontalen Bodenbewegung auf die Genauigkeit ist bisher nur selten richtig beurteilt worden (10); wie groß das Mitschwingen und die Bodenbewegung die sogenannte scheinbare Konstanz eines einzelnen Pendelpaares ($T_i - T_k$) beeinflussen können, zeigen die Werte in Tafel 3. Die Pendel sind mit ihrer sehr schwachen Dämpfung ($\Delta < 10^{-4}$) recht empfindliche Resonanzseismometer. Die Vergrößerung

für unendlich schnelle Schwingungen beträgt hier $\frac{2A^2}{1} : \frac{2 \cdot 172}{16} \sim 21,5$ -

fach. Stimmt jedoch die Eigenfrequenz der Bodenschwingungen mit der des Pendels sehr genau überein, dann könnte man eine theoretische Vergrößerung von ca. 50000fach errechnen. Wenn diese Zahl auch sehr gefährlich aussieht, so kommt doch nur ein sehr kleiner Frequenz-

bereich (Resonanzbreite $\frac{\Delta}{\pi} \cdot T$) in Frage und die Anschwingzeit würde

mehrere Stunden betragen. Aus diesen Gründen darf die Resonanzgefahr nicht überschätzt werden. Trotzdem muß man, wie auch meine Messungen leider ergeben haben, in der Nähe der Küste, besonders an Tagen großer mikroseismischer Unruhe, mit dem nachteiligen Einfluß der Bodenbewegung rechnen. Man kann dem nur praktisch begegnen, indem man die Energie des schwingenden Pendels möglichst groß gegenüber den Störkräften macht. Da der Amplitude eine Grenze gesetzt ist, wurde eine Erhöhung der Pendelmasse von 700 g auf 1200 g vorgenommen und der Schwerpunkt bei gleicher Schwingungsdauer etwas tiefer gelegt.

¹⁾ Gemessen MEISSER.

²⁾ A Lichtzeigerlänge: Pendelspiegel-Film.

Das sind die Gesichtspunkte, die in Verbindung mit einer Temperaturkompensation zur Dimensionierung eines Quarzglaspendels mit Wolframeinlage führten (11), um auch in Gegenden mit einer ausgesprochenen mikroseismischen Bodenunruhe mit derselben vollen Sicherheit arbeiten zu können. So kommt man auch von dieser Seite her in Verbindung mit dem logarithmischen Dekrement und der Registrierzeitgenauigkeit zu einer Beobachtungsdauer, die bei 2 Stunden liegt.

5. Das Auswertverfahren.

Das Auswerten beim Schwingungsdauerverfahren (Abb. 9) besteht darin, daß man die Nulldurchgänge der Pendelschwingungen auf eine

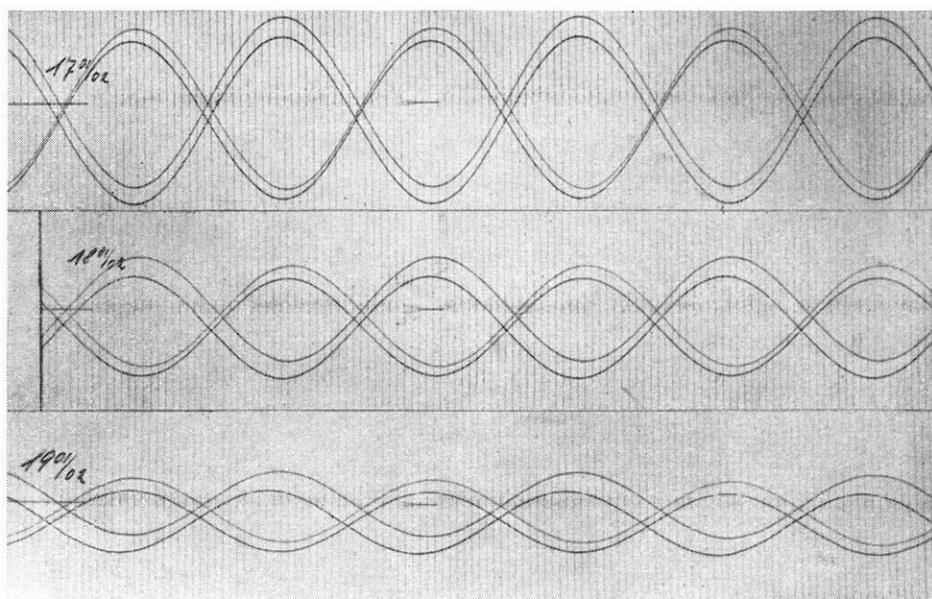


Abb. 9. Registrierkurven.

vorgegebene gleichzeitig mit aufgezeichnete Zeit(sekunden)marke bezieht. Zur Interpolation werden die Zeitmarken eines Stimmgabelzeitmarkierers benutzt. Die Schwingungsdauer (T) wird bestimmt, indem man den Anfangspunkt t_1 und Endpunkt t_2 von n Halbschwingungen bestimmt, es ist dann

$$T = \frac{t_2 - t_1}{n}. \quad (16)$$

Die Genauigkeit in T hängt dann von der Sicherheit Δt der Zeiten t_2 und t_1 ab, die Genauigkeit ΔT in T bzw. Δg in g ist

$$\Delta T = \frac{\Delta t \sqrt{2}}{t_2 - t_1} \cdot T \quad \text{bzw.} \quad \Delta g = \frac{2\sqrt{2} \Delta t}{t_2 - t_1}. \quad (17)$$

Wie bereits früher gezeigt (2), ist für die Genauigkeit die Auswert-sicherheit des Films Δt und die Dauer des Beobachtungsintervalls $t_2 - t_1$ maßgebend. Für $\Delta t = \pm 0,0005$ sec, $T = 0,4$ sec wird für $t_2 - t_1 = 2$ Stunden $\Delta T = \pm 3 \cdot 10^{-8}$ sec bzw. $\Delta g = \pm 0,15$ mgal. Zu beachten ist, daß hier noch nach keiner Richtung die evtl. Erhöhung der „Genauigkeit“ durch Häufung der Beobachtungen in Betracht gezogen ist.

Die Nullmarken werden als drei parallele Gerade (Abstand 5 mm) in die Pendelkurven durch schmale ($1/10^{-1}/5$ mm) Blenden an der Zylinderlinse dem Film aufgedruckt. Die Abbildung muß eine solche Schärfe aufweisen, daß die Ausmeßgenauigkeit von einigen $1/100$ mm noch voll gesichert ist. Sowohl die Justierung der Lichtpunkte wie die Stellung des Registrierapparates läßt nicht erwarten, daß die aufgedruckten Nullmarken mit den tatsächlich berechneten der aufgeschriebenen Kurven übereinstimmen. Aus diesem Grunde muß eingehend untersucht werden, wie sich die richtige Nullkurve aus den eingeschriebenen „scheinbaren“ Nulllinien berechnen läßt.

Bei einer beliebig geneigten Geraden (2) als „scheinbare Nulllinie“ wird der Nulldurchgang t_b , nach

$$t_{b_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{t_a + t_{a'}}{2} + t_b \right) \quad (18)$$

bestimmt (Abb. 10). Die Anzahl n Halbschwingungen zu Anfang und Ende des Beobachtungsintervalls ergibt sich demnach zu

$$n \cdot T = \left. \begin{aligned} & \frac{t_a + t_{a'}}{2} + t_b - \frac{t_a + t_{a'}}{2} + t_b = \frac{t_a - t_a + t_{a'} - t_a + 2(t_b - t_b)}{4} \\ & = \frac{1}{4} \{ t_a - t_a + (t_b - t_b) + t_{a'} - t_a + t_b - t_b \}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Bei einer guten Aufstellung des Registrierapparates kann man mit einer hinreichend „scheinbaren parallelen Nullkurve“ (N') rechnen (wenig-

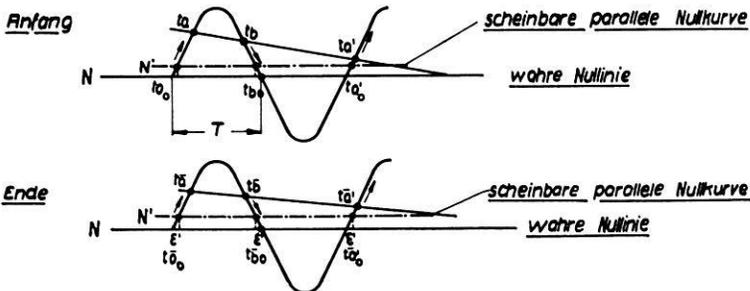


Abb. 10.

stens für die auszuwertende Halbschwingung) und die Formel (19) sagt dann – die Zeit $\frac{t_a + t_b}{2}$ bzw. $\frac{t_{\bar{a}} + t_{\bar{b}}}{2}$ oder $\frac{t_b + t_{\bar{a}'}}{2}$ bzw. $\frac{t_{\bar{b}} + t_{\bar{a}'}}{2}$ ergeben bekanntlich die Zeit des Maximums – daß man am Anfang und Ende die entsprechende aufeinanderfolgende Anzahl der nach oben (\uparrow) und unten (\downarrow) gehenden Durchgänge auswerten muß¹⁾. Es ist gleichgültig, ob man strenge Nulldurchgänge oder Eintrittszeiten für das Maximum voneinander abzieht, stets erhält man die richtigen Halbschwingungen²⁾. Die beiden Differenzgruppen der gleichsinnigen Durchgänge sind um so mehr einander gleich, je genauer N' mit der Nulllinie N zusammenfällt. Die Unsymmetrien der beiden Differenzgruppen können ihrerseits dazu benutzt werden, um die Lage der symmetrischen Nulllinie zu ermitteln. Diese symmetrische Nulllinie kann man mit Vorteil dazu benutzen, die Amplitude trotzdem zu bestimmen, wenn das eine Maximum der sin-Kurve nicht mehr auf den Film fällt. Die Mittelbildung der beiden Differenzgruppen ($\uparrow\downarrow$) liefert dann den richtigen Wert für das gerade Vielfache der Halbschwingung des Pendels.

Die Genauigkeit hängt wesentlich von der Konstanz der Stimmgabelzeitmarken ab. In Tafel 4 ist die Auswertung von 12 Pendelnulldurch-

Tafel 4.

Film Nr. 104 vom 14. XI. 1935 15^h 03^m 02–10^s.

Pendelnullmarke Q 10	Stimmgabel- intervall	Pendelnullmarke Q 10	Stimmgabel- intervall
0	0,00	7	285,06
1	40,73	8	325,82
2	81,45	9	366,54
3	122,16	10	407,26
4	162,92	11	448,00
5	203,63	12	488,73
6	244,36		40,73

gängen – die Pendelschwingungen sind im Prinzip genauer als jeder Uhrkontakt – gegeben. Die maximalen Abweichungen vom Mittelwert 40,73 Intervalle betragen $\pm 0,0006$ sec. Da man die Pendelnulldurch-

¹⁾ Nach Abb. 9 kann man für die t_i auf der Nullgeraden N' setzen

$$\begin{aligned}
 t_a &= t_{a_0} + \varepsilon & t_{\bar{a}} &= t_{\bar{a}_0} + \varepsilon' \\
 t_b &= t_{b_0} - \varepsilon = t & t_{\bar{b}} &= t_{\bar{b}_0} - \varepsilon' \\
 t_{a'} &= t_{a'_0} + \varepsilon = t_a + 2T & t_{\bar{a}'} &= t_{\bar{a}'_0} + \varepsilon = t_{\bar{a}} + 2T.
 \end{aligned}$$

Führt man die Werte von $t_{a'}$ und $t_{\bar{a}'}$ in (19) ein, so ist $nT = \frac{1}{2} [t_{\bar{a}} - t_a + t_{\bar{b}} - t_b]$.

²⁾ Beweis s. Fig. 38 MEISSER (2).

gänge nach Möglichkeit stets in der Nähe möglichst zwischen zwei entgegengesetzten (\uparrow und \downarrow) Durchgängen einer Zeitmarke (bei uns 2 sec drahtlose Zeitenmarken) wählen wird, so ist der zu interpolierende Zeitraum höchstens T, d. h. ca. 0,407 sec und der maximale Interpolationsfehler $\pm 0,0003$ sec, d. h. von seiten der Stimmgabel, deren Schwingungsdauer genau justiert ist ($0,02 \pm 2 \cdot 10^{-5}$ sec) und deren Temperaturkoeffizient (etwa 10^{-5}) auch klein ist, kommen (bei genügender Kontrolle durch die Pendelschwingungen oder die Sekundenzeitmarken) keine maximal auftretenden Fehler über $\pm 0,0005$ sec in Frage.

Um für das Auswerten diese Konstanz der Stimmgabel auch recht nutzbringend anwenden zu können, wird die Registriergeschwindigkeit des Films (durch Schwungmassen) auf $\frac{100 \text{ mm}}{\text{sec}} \pm \frac{1 \text{ mm}}{\text{sec}}$ eingestellt und auf unter $\frac{1}{2}^0/0$ in sich konstant gehalten. Somit kann man durch in $\frac{1}{4}$ Intervalle unterteilte Maßstäbe für die Intervallen 1,95...2,05 mm mit einer Lupe bequem die Zeiten auf 0,0005 sec schätzen. So wird mit einfachsten Mitteln in kürzester Zeit eine sichere Auswertung ohne lästige Umrechnung von der Stimmgabel gewährleistet. Steht mehr Zeit zur Verfügung, so können auch andere Hilfsmittel (Komparator) Verwendung finden.

Tafel 5.

Ort	Tag	Feldstation ¹⁾		
		Beobachtungszeitraum Stunden, Minuten	Einzelpendel	
			Q 7 10 ⁻³ sec	Q 8 10 ⁻³ sec
Schleiz	18. XI. 35	(17 ³¹ /19 ³¹)... (17 ³² /19 ³²)	0,2	0,2
Schleiz	19. XI. 35	(4 ³¹ / 6 ³¹)... (4 ³² / 6 ³²)	- 0,2	0,1
Tann	23. XI. 35	(17 ³¹ /19 ³¹)... (17 ³² /19 ³²)	1,6	1,0
Bergen	2. XII. 35	(17 ²⁸ /19 ²⁸)... (17 ²⁹ /19 ²⁹)	0,6	1,4
Bergen	3. XII. 35	(4 ²⁸ / 6 ²⁸)... (4 ²⁹ / 6 ²⁹)	- 1,4	- 1,1
Tessin	4. XII. 35	(17 ²⁸ /19 ²⁸)... (17 ²⁹ /19 ²⁹)	1,2	2,5
Tessin	5. XII. 35	(4 ²⁸ / 6 ²⁸)... (4 ²⁹ / 6 ²⁹)	- 0,1	0
Neubrandenburg	6. XII. 35	(17 ²⁸ /19 ²⁸)... (17 ²⁹ /19 ²⁹)	1,2	1,5
Neubrandenburg	7. XII. 35	(4 ²⁸ / 6 ²⁸)... (4 ²⁹ / 6 ²⁹)	- 0,8	- 0,3
Swinemünde ...	10. XII. 35	(4 ²⁸ / 6 ²⁸)... (4 ²⁹ / 6 ²⁹)	0,8	0,5
Prenzlau	11. XII. 35	(17 ²⁸ /19 ²⁸)... (17 ²⁹ /19 ²⁹)	- 0,1	0,2
Prenzlau	12. XII. 35	(4 ²⁸ / 6 ²⁸)... (4 ²⁹ / 6 ²⁹)	- 0,5	- 2,3

¹⁾ Gemessen MEISSER.

6. Beobachtungsverfahren.

Die gesamte Anlage dieser Pendelapparatur war bewußt in der Hauptsache für relative Pendelmessungen geplant. Um die Uhrangfehler auszuschalten, wird stets an zwei verschiedenen Orten (Basis und Meßpunkt) gleichzeitig mit genau denselben drahtlosen Zeitsignalen gearbeitet. Da uns selbst genügend Hilfsmittel auf unserer jeweiligen Feldbasis (z. B. Hannover, Jena) zur Verfügung standen, brauchten wir nicht die internationalen Zeitzeichen auf den langen elektrischen Wellen zu benutzen, sondern es wurden mit einem Sender (Leistung 1 kW, Welle ca. 1000 m) für die einzelnen Messungen je nach Bedarf durch eine besondere Uhr von uns selbst die Zeitzeichen gegeben. Dadurch war für den Empfang eine hinreichende Energie gesichert, der Wellenbereich war ziemlich fading- und brauchbar störungsfrei, außerdem lagen die entsprechenden 2-Stunden-Sendeintervalle nach Bedarf günstig. Demgegenüber mußte jedoch ein eigener Basisdienst eingerichtet werden, der bei einem einigermaßen gesicherten Zeitdienst mit Anschluß an Quarzuhren (12) freilich stark eingeschränkt werden kann.

Grundsätzlich werden an den gleichzeitig registrierenden Stationen die gleichen Einsätze derselben festgelegten Zeitzeichen aufgenommen und ausgewertet. Um zu zeigen, daß bei Verwendung derselben Emp-

Tafel 5 (Fortsetzung).

Feldstation		Mittelwert für mittl. Pendel 10 ⁻³ sec	Basisstation ¹⁾	Differenz Feldst.-Basis 10 ⁻³ sec
Einzelpendel	Jena Mittelwert 10 ⁻³ sec			
Q 9 10 ⁻³ sec	Q 10 10 ⁻³ sec			
1,2	0,3	0,5 ± 0,3	- 0,5	1,0
0,7	- 0,5	0,0 ± 0,3	- 0,3	0,3
1,8	2,0	1,6 ± 0,3	1,1	0,5
1,2	- 0,2	0,8 ± 0,4	0,1	0,7
- 2,1	- 0,6	- 1,3 ± 0,3	0,1	1,3
2,6	1,7	2,0 ± 0,3	1,4	0,6
- 0,6	0,2	- 0,1 ± 0,1	0,6	- 0,7
- 0,1	1,7	1,0 ± 0,5	0,1	0,9
- 0,3	- 0,1	- 0,4 ± 0,1	- 1,0	0,6
1,0	0,8	0,8 ± 0,1	1,0	- 0,2
0,6	0,6	0,4 ± 0,2	0,4	0,0
- 0,6	- 1,4	- 1,3 ± 0,4	- 0,6	- 0,7

¹⁾ Gemessen MARTIN.

fangsbedingungen am Anfang und Ende des Beobachtungszeitraumes die Fehler unter $\angle 1 \cdot 10^{-3}$ sec betragen, sind in Tafel 5 die Differenzen der Zeiten für die gleiche Anzahl der Pendelschwingungen (2 Stunden ungefähr) von aufeinanderfolgenden Minuten auf der Feld- und Basisstation angegeben. Die entsprechenden Differenzen der Einzelpendel (Q 7...Q 10) sind ein Maß für die erreichte Auswertgenauigkeit. Diese beträgt auch bei verschiedenen Beobachtern für das mittlere Pendel $T_m \pm 0,4 \cdot 10^{-3}$ sec, wenn stets die Kurven mit der nötigen Schärfe aufgezeichnet sind. Betrachtet man die entsprechenden Intervalldifferenzen auf der Feld- und Basisstation (letzte Spalte, Tafel 5), so geht in ihren Unterschied als weitere Fehlerquelle der drahtlose Empfang ein. Man kann aus den experimentell ermittelten Werten entnehmen, daß höchstens eine Unsicherheit von $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ sec, d. h. $\pm 0,3$ mgal durch das Zusammenwirken von Auswertungsunsicherheit und evtl. Störungen im gleichzeitigen drahtlosen Empfang an beiden Stationen auftreten kann. Die geringen Werte der einzelnen Differenzen $1^{-2}/_{1000}$ sec zeigen, daß der Sender in Weimar¹⁾ über 2 Relais meistens mit einer bei Koinzidenzzeitensignalen üblichen Genauigkeit die Zeitzeichen gab. Man erhält aus den Stationen in den verschiedensten Entfernungen (bis 600 km) dieselben geringen Fehler.

7. Die Genauigkeit der relativen Schweremessungen.

Die Genauigkeit der gemessenen Schwerewerte wird bei den hier angewandten Verfahren in der Hauptsache durch die Konstanz der Pendel auf der Feldstation und durch die Zuverlässigkeit der Basis angegeben. Wie bisher stets das Streben dahin ging, die meisten „Korrekturen“ zu verkleinern bzw. zu vermeiden, so ist dem bei der Benutzung der Basiswerte wie bei den Anforderungen an die Pendelkonstanz auch in der Praxis weitgehend Rechnung getragen worden. Für jedes Meßgebiet waren sogenannte Hilfsbasisstationen vorgesehen und es wurde meistens nach zwei Feldstationen ein „Anschluß“ gemessen, so daß unter ungünstigen Umständen auch ein einseitiger Anschluß in Betracht gezogen werden konnte. Die Anforderungen an die zeitliche Konstanz sind dadurch geringer und die Möglichkeit, sogenannte „Sprünge“ scharf zu überwachen, ist stark gesteigert. Wie die an anderer Stelle (13) teilweise mitgeteilten Basiswerte 1935 zeigen, könnte man aus den beiden gegeneinanderschwingenden Sterneckpendeln und zwei Riefleruhren für die kurzen Meßzeiten von einigen Tagen eine Sicherheit von ungefähr

¹⁾ Ein Pendelkontakt an einem Sekundenpendel tastete über ein einfaches Relais das Senderrelais.

$\frac{1}{2}$ mgal entnehmen. Dadurch, daß für die endgültige Auswertung noch eine bzw. zwei weitere Basisstationen¹⁾ zur Kontrolle verfügbar waren, ließ sich der Basisfehler unter $\frac{1}{2}$ mgal halten. Eine weitere Prüfung ergaben die mehrfach vermessenen Feld- bzw. Hilfsbasisstationen, wie überhaupt jede Art von Anschlußmessungen. In der folgenden Tafel 6 sind Anschlußmessungen wiedergegeben, die eine Änderung des Feldapparates bzw. der Basisinstrumente um 0,8 mgal aufweisen. Der

Tafel 6.

Basisstation	Basisinstrumente ²⁾	Feldapparat 807 ³⁾
Jena: 15. XI. 37	Stand: 0,0 mgal	Stand: 0,0 mgal
Jena: 27./28. XI. 37	Stand: - 2,3 mgal	Stand: - 3,1 mgal

Anschlußfehler ist $\pm 0,4$ mgal für diese Thüringer Schleife. Das weitere Beispiel in Tafel 7 zeigt die Werte an der Basis Jena und an der Hilfsbasis Neubrandenburg.

Tafel 7.

	Basisstation Jena ²⁾	Hilfsbasis Neubrandenburg
	Sterneckpendel	Feldapparat 807 ³⁾
6./7. XII. 37	Stand: 0,0 mgal	Stand: 0,0 mgal
14. XII. 37	Stand: + 3,8 mgal	Stand: + 3,3 mgal

Hier beträgt der maximale Fehler, der vom Anschluß für die Schleife herrührt, wiederum ohne zusätzliche Korrektion $\pm 0,25$ mgal.

Um auch an den Feldstationen bereits ein Anzeichen für die Güte der Pendel zu besitzen, wird die Differenz der mittleren Halbschwingungen der beiden Pendelpaare benutzt. Die Größe muß unabhängig von den üblichen Korrekturen theoretisch konstant bleiben. Ihre Abweichungen geben ein gutes Maß für die Güte der Pendel und evtl. auch einen Hinweis für etwaige Verbesserungen. In der folgenden Tafel 8 sind diese Differenzen der beiden Pendelpaare für einige aufeinanderfolgende Feldstationen in Einheiten der 7. Dezimale (sec) angegeben.

Es treten doch immerhin noch Differenzen auf, die nur durch den besonderen Einfluß der Bodenbewegung und den noch nicht vollständigen Temperatenausgleich erklärt werden können. Auffallend ist der

¹⁾ Geophysikalisches Institut Göttingen bzw. Physikalisches Institut Clausthal.

²⁾ Gemessen MARTIN.

³⁾ Gemessen MEISSER.

geringe Wert in Prenzlau (Aufstellung nicht sehr gut und sehr warmes Zimmer) und die Differenz (−35,3) in Neubrandenburg. Hier war während der ersten Messung in einer benachbarten Turnhalle Unter-richt, so daß man auf dem lockeren Boden deutlich den Einfluß der Bodenbewegung sehen kann. Die Stationen in Thüringen dagegen liegen auf sehr festem Boden.

Als letztes Kriterium für die erzielte Genauigkeit dienen unsere Ergebnisse an den Wiederholungsstationen, die einwandfrei gemessen

Tafel 8.

Ort	$\frac{T_7 + T_8}{2}$	$\frac{T_8 + T_{10}}{2}$
	1. Messung	2. Messung
Schleife Pommern ¹⁾		
Bergen	− 3,8	− 7,4
Tessin	− 5,7	− 6,5
Neubrandenburg...	− 4,5	− 5,2
Swinemünde	− 3,0	− 7,0
Prenzlau	− 0,5	− 0,5
Neubrandenburg...	(− 35,3) ²⁾	− 8,3
Putlitz	− 8,9	− 7,1
Schleife Thüringen ¹⁾		
Schleiz	− 1,4	− 0,9
Ilmenau	+ 1,3	+ 2,1
Tann	+ 1,9	+ 2,0
Greußen	+ 1,4	+ 1,6

sind. Es haben sich aus zwei Messungen mit unserem Apparat folgende Abweichungen ergeben: Schleiz: $\pm 0,4$ mgal, Goldenstädt: $\pm 0,3$ mgal, die anderen Wiederholungsstationen können nicht mit herangezogen werden, da wegen irgendwelcher Mängel der zuerst gemessene Wert verworfen werden mußte und daher eine Wiederholung erforderlich war. Zum weiteren Vergleich könnten noch Schleifenfehler angegeben werden; doch erhält man daraus für kleine Differenzen keine Genauigkeitsangabe für eine Einzelmessung.

Zusammenfassend kann man hinsichtlich der erreichten Genauigkeit sagen: Unter Benutzung einer zuverlässigen Basis kann man für eine Messung mit vier gleichzeitig schwingenden Quarzglaspendeln bei zweimaliger Beobachtung an einer Station eine Meßsicherheit von $\pm 0,5$ mgal erreichen.

¹⁾ Gemessen MEISSER.

²⁾ Wird nicht benutzt.

Verzeichnis der angeführten Schriften.

1. O. MEISSER, Experimentelle Untersuchungen an Quarzglaspendeln mit Quarzglasschneiden. Beitr. z. angew. Geophysik. Bd. 4, 1934, S. 252–257.
2. O. MEISSER, Pendel und Schwingungsdauerverfahren. Veröfl. d. Reichsanst. f. Erdbebenf. Heft 17, S. 1–74. 1931.
3. H. MARTIN, Das photographische Koinzidenzverfahren und das Pendel als Zeitmesser. Veröfl. d. Reichsanst. f. Erdbebenf. Heft 17, S. 74–135. 1931.
4. M. RÖSSIGER, Über den Einfluß des erdmagnetischen Feldes auf die Schwingungszeiten von Nickelstahlpendeln. Zeitschr. f. Instrumentenk. Bd. 50, 1930, S. 551–552.
5. E. C. BULLARD, The effect of a magnetic field on relative gravity determinations with invar pendulums. Proc. of the Cambridge Philos. Soc. XXIX, part 2, 1933, S. 288–296.
6. O. MEISSER, Schneiden- und Unterlagenmaterial bei invariablen Pendeln für relative Schweremessungen. Zeitschr. f. Geophysik. Bd. 9, 1933, S. 173–180.
7. G. MÖNCH, Eine neue Form des abgekürzten Manometers. Zeitschr. f. techn. Physik. Bd. 8, 1935, S. 236–237.
8. O. MEISSER, Das logarithmische Dekrement von Pendeln. Zeitschr. f. Geophysik. Bd. 9, 1933, S. 88–90.
9. O. MEISSER, Instrumente der gravimetrischen Aufschlußmethoden. Gutenberg Handb. d. Geophysik. Bd. VI, 1931.
10. F. A. VENING-MEINESZ, Observations de pendule dans les Bays-Bas, 1913–21. Delft 1923 (Publ. de la commission géodésique néerlandaise).
11. O. MEISSER, Temperaturkompensiertes Stabpendel. Annalen der Physik. 5. Folge, Bd. 28, 1937, S. 114–120.
12. SCHMEHL, Vorläufiger Bericht über die Ermittlung orthometrischer Höhenverbesserungen auf den Punkten der Nivellementsschleife Magdeburg-Braunschweig-Celle-Stendal-Magdeburg aus Schweremessungen. Verh. d. Balt. Geodät. Kommission Helsinki 1936, S. 64–67.
13. O. MEISSER und H. MARTIN, Relative Konstanz bei ortsfesten Schwerependeln. Physikal. Zeitschr. Bd. 37, 1936, S. 165–166.



DRUCK DER OFFIZIN
POESCHEL & TREPTE
IN LEIPZIG