

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 34 (1956)

Heft: 10

Artikel: Eine tragbare Apparatur zur Messung von Erschütterungen im Frequenzbereich von 0,2...60 Hz und ihre Eichung

Autor: Vögtli, Kurt

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874544>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

TECHNISCHE MITTEILUNGEN
BULLETIN TECHNIQUE

PTT
BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telefonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

**Eine tragbare Apparatur zur Messung von Erschütterungen
im Frequenzbereich von 0,2...60 Hz und ihre Eichung**

Von Kurt Vögli, Bern

534.647

Zusammenfassung. Es wird eine Apparatur beschrieben, die zur Messung von Erschütterungen im Frequenzbereich von 0,2...60 Hz geeignet ist. Die zwei im Aufbau identischen Horizontalseismometer und das Vertikalseismometer werden von einer Zentrale aus ferngesteuert und ihre Signale amplitudenproportional verstärkt und registriert. Die Seismometer können statisch geeicht werden, wurden aber auch dynamisch geprüft. Die Eich-einrichtungen, insbesondere der Aufbau eines Schütteltisches mit horizontaler und vertikaler Arbeitsrichtung sowie die Konstruktion eines Tieftongenerators werden beschrieben. Ferner wird über das Verhalten der Apparatur im Feldbetrieb berichtet.

Résumé. L'auteur décrit un ensemble d'instruments servant à mesurer les ébranlements dans la bande de fréquences de 0,2 à 60 Hz. Les deux sismomètres horizontaux, construits de façon identique, et le sismomètre vertical sont commandés à distance à partir d'un central et leurs signaux sont amplifiés et enregistrés proportionnellement à leur amplitude. Les sismomètres peuvent être étalonnés statiquement, mais ils ont été contrôlés dynamiquement. Ensuite, l'auteur traite les dispositifs d'étalonnage, en particulier la construction d'une table à secousses à sens de fonctionnement horizontal et vertical, ainsi que d'un générateur à basses fréquences. En outre, il rapporte sur le comportement de l'ensemble d'instruments en service en plein air.

Hören wir etwas, so denken wir kaum daran, dass das als Ton Bewusstgewordene seinen Ursprung in raschen Luftdruckschwankungen hat und diese wieder in den meisten Fällen durch schwingende Körper erzeugt werden. Das menschliche Gehör vermag nur in einem begrenzten Frequenzband Schwingungen wahrzunehmen. Die tiefsten Töne haben eine Frequenz von etwa 16 Hz, die höchsten eine solche bis zu 16 000 Hz. Bei einer mittleren Frequenz von 1000 Hz ist das Ohr ein sehr empfindliches Sinnesorgan, genügen doch bereits Amplituden von etwa 10^{-7} mm der erregten Luftmoleküle, um einen Schalleindruck auszulösen. Bei den tiefsten noch hörbaren Schwingungen muss die Amplitude 3000mal grösser sein, damit etwas gehört wird. Der Körperschall ist in diesem Falle mit Hilfe des Tast- und Gleichgewichtsinnes bereits als Erschütterung wahrzunehmen, bevor das Gehör reagiert. So liegt die Fühlbarkeitsgrenze für eine Erschütterung von 20 Hz bei etwa 10^{-4} mm Amplitude. Schwingungen, deren Frequenzen unterhalb 16 Hz liegen, können nur noch gefühlt werden, es sei denn, dass die Verschiebungen als Relativbewegungen gegenüber einem ruhenden Punkt visuell wahrgenommen werden. Bei sehr tiefen Frequenzen müssen die Amplituden der Bewegungen

schon gross sein, damit sie oberhalb der Fühlbarkeitsgrenze liegen. Für eine Bewegung mit einer Periode von 10 s muss zum Beispiel die Amplitude einige Millimeter betragen, damit sie als Erschütterung wahrgenommen wird. Für die Messung derart niederfrequenter Schwingungen besteht daher ein Bedürfnis nach Apparaten mit grösserer Empfindlichkeit, da Erschütterungen mit Frequenzen unterhalb 50 Hz sehr häufig auftreten. So die Erdbebenwellen, die im Herdgebiet oft verheerende Folgen haben, in grösserer Entfernung aber nur mehr apparativ nachgewiesen werden können. Da die Wellen von grossen Beben die ganze Erde durchlaufen, gestattet ihre Analyse Aussagen über den inneren Aufbau unseres Planeten. Kleine, durch Sprengungen künstlich erzeugte Beben und deren Wellenfelder dienen der Erforschung des Untergrundes bis in mehrere Kilometer Tiefe. Diese Methodik der angewandten Geophysik spielt heute in der Erdölprospektion eine dominierende Rolle. In gleicher Weise kann man aber auch die Eisdicke eines Gletschers, die Mächtigkeit einer Sedimentschicht oder die Tiefe einer zerrütteten Gesteinszone bestimmen, so dass die angewandte Seismik immer mehr zur Lösung bautechnischer Probleme herangezogen wird.

Tieffrequente Erschütterungen werden aber auch durch Industrie und Verkehr erzeugt. Brücken, Türme, Hochkamine, Masten und Häuser werden durch solche Erschütterungen zusätzlich beansprucht. Selbst wenn keine Gefährdung eines Bauwerks besteht, haben Schwingungen häufig unangenehme Folgen bei Messungen mit Analysenwaagen und Galvanometern, bei photographischen Reproduktionen, bei Arbeiten mit Teilmaschinen usw. Auch metallurgische Prozesse können ausgelöst werden, besonders Ermüdungsbrüche infolge Rekristallisation und Disglomeration des Gefüges.

Die Erforschung aller dieser Erscheinungen setzt immer zunächst die Möglichkeit einer zuverlässigen Erschütterungsmessung voraus. Einen Beitrag zu diesem komplexen Problem bildet die folgende Arbeit, die vor einiger Zeit an der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich gemacht wurde. Dem Vorsteher des Instituts für Geophysik, Herrn Prof. Dr. F. Gassmann, Herrn P. D. M. Weber sowie allen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, sei auch an dieser Stelle nochmals bestens gedankt.

A. DIE SEISMOMETER

1. Allgemeines

Der mechanische Teil eines Seismometers besteht aus einem Schwinger, der so in einem Gestell montiert ist, dass er um eine stabile Gleichgewichtslage schwingen kann. Die Relativbewegungen zwischen dem Schwinger und dem Gestell bilden den Ausgangspunkt der Registrierung. Zum Gestell wird ausser dem Rahmen des Seismometers auch noch die Unterlage (zum Beispiel ein Stück des Bodens oder das Instrumentenfundament) gerechnet, die sich zusammen wie ein starrer Körper verhalten sollen. Über die möglichen Ausbildungen der Schwinger vgl. F. Gassmann [10] und M. Weber [18, 20]*.

Sind nur translatorische Verschiebungen vorhanden, so wird von den Schwingern verlangt, dass sie sich analog verhalten wie ein Massenpunkt, der durch massenlose Federn in einer stabilen Gleichgewichtslage gehalten wird. Ist die Bewegungsfreiheit des Massenpunktes durch eine geradlinige Führung eingeschränkt, so erhält man Systeme mit nur einem Freiheitsgrad. Zur allgemeinen Theorie der Seismographen mit einem Freiheitsgrad vgl. F. Gassmann [10] und M. Weber [20]. Mit drei Systemen dieser Art, deren Arbeitsrichtungen nicht in derselben Ebene liegen und deren Rahmen mit der Unterlage einen starren Körper bilden, können rein translatorische Bewegungen der Unterlage vollständig erfasst werden. Gewöhnlich orientiert man die Arbeitsrichtungen so, dass eine mit der Vertikalen zusammenfällt, während die beiden andern senkrecht zueinander in einer horizontalen Ebene liegen. Beim Vertikalpendel fällt die Arbeitsrichtung des Seismometers mit der Richtung des Schwerfeldes zusammen.

Dieser Umstand hat bei den meisten Seismometer-Konstruktionen grosse Unterschiede im Aufbau des Vertikalpendels gegenüber den Horizontalpendeln zur Folge. Auch in unserem Falle ist die Konstruktion der beiden untereinander praktisch identischen Horizontalpendel stark verschieden von derjenigen des Vertikalpendels.

2. Der prinzipielle Aufbau der Seismometer

Ein Seismometer besteht mechanisch aus dem Rahmen und dem Schwinger, zu dem alle Teile gehören, die sich relativ zum Rahmen bewegen können. Funktionelle Einheiten bilden: der elektromechanische Umformer, die Dämpfung, die Nullpunktregulierung sowie die mechanischen Aufbauelemente, wie zum Beispiel die Aufhängung oder die Arretierung. Es wird bei der Beschreibung dieser Einheiten jeweils darauf hinzuweisen sein, welche Teile zum Rahmen und welche zum Schwinger gehören.

3. Der Aufbau der Horizontalpendel

a) Der elektromechanische Umformer

Bei manchen Seismometern wird die Verschiebung des Schwingers gegenüber dem Rahmen direkt registriert. Die gewünschte Vergrösserung wird dabei durch Hebelsysteme bewirkt, wobei aber eine Rückwirkung der Reibung der Schreibfeder auf den Schwinger besteht. Um auch bei starken Vergrösserungen den Einfluss dieser Kräfte hinreichend klein zu halten, muss die Pendelmasse bei solchen Instrumenten sehr gross gemacht werden, was die Benutzung dieser Art der Registrierung bei transportablen Geräten erschwert. Günstiger sind Seismometer mit optischen Vergrösserungssystemen. Solche Geräte können sehr klein gebaut werden, besitzen indessen den Nachteil der teuren und umständlichen photographischen Registrierung. Beide Systeme weisen zudem den Nachteil auf, dass die Registrierung in der Nähe der Seismometer erfolgen muss.

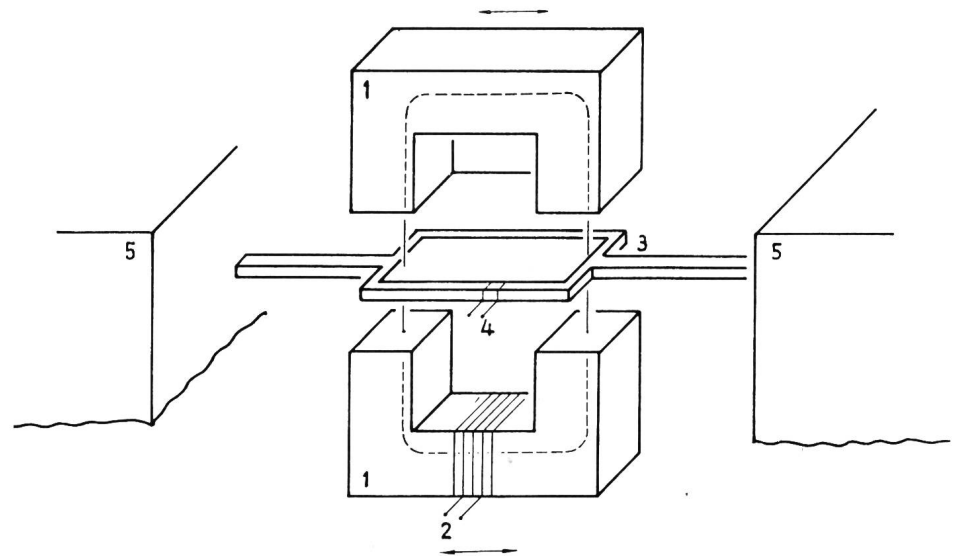
Eine zur Geschwindigkeit der Relativbewegungen Schwinger-Rahmen proportionale elektrische Spannung erhält man, wenn man als elektromechanischen Umformer ein Tauchspul- oder Reluktanzsystem verwendet. Die so erhaltene Signalspannung kann zur allenfalls weit entfernten Zentrale geführt werden, wo die Registrierung beispielsweise mit Hilfe eines Galvanometers erfolgen kann. Für gewisse Untersuchungen ist der Umstand einer Empfindlichkeitsabnahme mit kleiner werdender Frequenz, die für den Grenzfall einer statischen Auslenkung des Schwingers null wird, hinderlich. Im folgenden wird ein System beschrieben, das ein zur Auslenkung des Schwingers proportionales elektrisches Signal liefert. Der prinzipielle Aufbau dieses elektromechanischen Umformers ist in Figur 1 dargestellt.

Die beiden U-förmigen Körper (1) aus lamelliertem Eisenblech gehören zum Schwinger und sind beweglich gegenüber dem Rahmen, der durch die Pfeiler

* Vgl. Bibliographie am Schluss der vorliegenden Arbeit.

Fig. 1.
Prinzipschema des elektromechanischen Umformers

- 1 = Eisenkern (beweglich)
- 2 = Erregerwicklung
- 3 = Spulenträger (fest)
- 4 = Signalspule
- 5 = Rahmen



(5) angedeutet ist. Die Körper (1) sind durch weitere in Figur 1 nicht dargestellte Teile des Schwingers starr miteinander verbunden. Die Erregerwicklung (2) wird von einem Wechselstrom durchflossen, so dass zwischen den Schenkeln der Eisenkörper, die in Wirklichkeit nur durch einen etwa 2 mm breiten Spaltraum getrennt sind, zwei magnetische Wechselfelder entstehen. Die Feldrichtungen sind in den beiden Spalträumen immer um 180° verschieden. In Figur 1 ist der Feldfluss durch eine einzelne Kraftlinie angedeutet. Die Spule (4), die in dem mit dem Gestell fest verbundenen Träger (3) eingelassen ist, wird von einem Teil der magnetischen Feldlinien durchsetzt. Dabei wird bei einer bestimmten Stellung des Schwingers die Spule (4) von gleich vielen der um je 180° verschobenen Feldlinien durchflutet, so dass im gesamten keine Wechselspannung induziert wird. Bewegt sich der Schwinger aus dieser «Nullage» nach der einen oder anderen Seite, so wird – homogene Felder vorausgesetzt – in der Spule (4) eine zur Auslenkung proportionale Signalspannung induziert. Dabei sind die Signale je nach der Richtung der Auslenkung in bezug auf den Erregerstrom der Wicklung (2) um $+90^\circ$ oder -90° in der Phase verschoben. Aus der Amplitude des Signals kann daher auf die Grösse der Auslenkung und aus der Phasenlage auf die Richtung des Ausschlages geschlossen werden. Dies ist an die Voraussetzung gebunden, dass die Frequenz des Magnetfeldes gross ist im Vergleich zur Frequenz der Bewegungen des Schwingers. Die praktisch erreichbaren magnetischen Feldstärken ergeben eine hohe Empfindlichkeit des Umformers und einen zuverlässigen Betrieb.

b) Die Dämpfung

Dem Schwinger entzieht schon die Reibung mit der ihn umgebenden Luft etwas Energie, so dass die Schwingweite des frei schwingenden Pendels mit der Zeit immer kleiner wird. Auch die mit den Bewegungen verbundenen Deformationen der Federgelenke,

die den Schwinger mit dem Rahmen verbinden, sind nicht rein elastisch, so dass auch an diesen Stellen mechanische Energie verloren geht. Neben diesen unvermeidlichen kleinen Effekten bewirken besonders eingebaute Dämpfungsglieder eine wirksame Dämpfung.

Allgemein ist man bestrebt, Dämpfungskräfte zu erhalten, die proportional zur Geschwindigkeit der Relativbewegungen zwischen dem Schwinger und dem Rahmen sind. Diese Forderung ist am genauesten bei einer Wirbelstrombremse, weniger exakt bei Systemen mit Luft- oder Flüssigkeitsreibung erfüllt.

Bei einer Wirbelstrombremse bewegt sich ein gut leitendes Metallstück in einem Magnetfeld. Die induzierten *Foucaultschen* Ströme wirken dabei hemmend auf die Bewegung ein. Prinzipiell ist es gleichgültig, wie das Magnetfeld erzeugt wird. In unserem Falle wird einerseits ein von zwei Permanentmagneten erzeugtes Feld benutzt, andererseits ist auch eine zusätzliche Wirbelstrombremse mit elektromagnetischer Erregung vorhanden. In beiden Fällen sind die massiven Kupferplatten mit dem Schwinger, die Magnete mit dem Rahmen verbunden. Die elektromagnetische Wirbelstrombremse hat den Nachteil eines ständigen Stromverbrauches. Dafür kann die dämpfende Wirkung durch einfache Variation des Erregerstromes – eventuell von einer weit entfernten Stelle aus – geändert werden. Die dämpfende Kraft ist im vorliegenden Falle proportional zum Quadrat der Feldstärke und damit auch bis ins Gebiet der Sättigung proportional zum Quadrat des Erregerstromes. Die Grösse der Dämpfung kann aus Abklingversuchen bestimmt werden. Das Verhältnis zweier benachbarter Schwingweiten – das ist das Verhältnis der Wege eines Punktes des Schwingers von der einen Extremstellung durch die Ruhelage zur andern und von dieser wieder zurück zur neuen, von der Ruhelage nun weniger weit entfernten Extremstellung auf der Seite des Ausgangspunktes –

wird als das Dämpfungsverhältnis bezeichnet. Diese Grösse ist aber bei unveränderter Wirkung der dämpfenden Glieder eine Funktion der Eigenfrequenz. Sie eignet sich daher nicht gut zur Charakterisierung bei Seismometern mit variabler Eigenfrequenz. Unabhängig von der Eigenfrequenz ist dagegen die Dämpfungskonstante γ , deren Bedeutung aus der Differentialgleichung der freien Schwingungen ersichtlich ist:

$$\ddot{U}_o + 2\gamma \dot{U}_o + \nu^2 U_o = 0.$$

Punkte bedeuten Ableitungen nach der Zeit t . $U_o = U_o(t)$ ist der Indikatorenausschlag, γ die Dämpfungskonstante, $\frac{\nu}{2\pi}$ die reduzierte Eigenfrequenz des Seismographen (Eigenfrequenz ohne Dämpfung), $\frac{\nu'}{2\pi}$ die Eigenfrequenz des gedämpften Seismographen. Zwischen γ , dem Dämpfungsverhältnis δ und den Frequenzen bestehen die Beziehungen:

$$\gamma = \frac{I}{\pi} \nu' \ln \delta$$

und

$$\gamma^2 = \nu^2 - \nu'^2.$$

Der Widerstand der Spule, die den Elektromagneten erregt, beträgt 5Ω . Das Gebiet der Sättigung wird bei etwa 1 A Erregerstrom erreicht.

Es folgt eine Zusammenstellung der Dämpfungskonstanten der beiden Horizontalpendel (zur Unterscheidung der beiden gleichgebauten Horizontalpendel ist auf ihren Fußschrauben ein X bzw. ein Y eingraviert, so dass wir einfach von einem X-, bzw. einem Y-Pendel sprechen können).

| Dämpfungsart | γ (X-Pendel) | γ (Y-Pendel) |
|--|------------------------|------------------------|
| Ohne spezielle Dämpfung . . . | (CGS) 0,019 | (CGS) 0,019 |
| Wirbelstrombremsung: | | |
| Permanentmagnetische allein . | 0,333 | 0,436 |
| Permanentmagnetisch und elektromagnetisch (1,2 A) . . | 0,951 | 0,786 |

c) Die Nullpunktregulierung

Die Einstellmöglichkeiten der Nullage sind:

1. Drehung des Seismometers um eine Achse, die senkrecht zur Arbeitsrichtung und zur Drehachse des Pendels steht;
2. Änderung der Vorspannung einer Hilfsfeder, die parallel zur Arbeitsrichtung des Pendels wirkt;
3. Betätigung der elektromagnetischen Feinregulierung.

Zu Beginn einer Messung wird die Lage des Seismometers durch Neigen geändert, bis eine Libelle, die parallel zur Arbeitsrichtung des Pendels spielt, einjustiert ist. Bei starker Vergrößerung muss gewöhnlich die Nullage noch genauer eingestellt werden,

wobei als Kriterium das infolge der Auslenkung noch vorhandene Signal selber, bzw. dessen Verschwinden benutzt wird. Da die Verstärkerapparatur vom Standort der Seismometer unter Umständen weit entfernt ist, wird die verstärkte Signalspannung wieder zum Seismometer zurückgeführt, wo sie auf einem geeigneten Instrument kontrolliert werden kann. Dadurch können die Pendel von einem Mann allein einjustiert werden.

Eine allfällige Nullpunktunsicherheit könnte bei den gebauten Seismometern nur durch Unvollkommenheiten der Federgelenke bedingt sein. Versuche, die bei einer Eigenfrequenz von 0,3 Hz ausgeführt wurden, ergaben bei einer 20 000-fachen Vergrößerung und einer Strichbreite von 0,1 mm noch keine merkliche Unsicherheit in der Lage der Nulllinie.

Es kommt vor, dass sich der Nullpunkt mit der Zeit verschiebt. Die Ursache kann eine instabile Aufstellung des Instruments sein oder aber im Temperaturgang liegen. Solche Nullpunktverschiebungen stören besonders bei Benutzung starker Vergrößerungen. Zur Kompensation dieser Verschiebungen ist eine elektromagnetische Vorrichtung eingebaut. Am Schwinger ist ein kleines Stück Weicheisen befestigt, das in eine Spule eintaucht, die starr mit dem Rahmen verbunden ist. Lässt man einen elektrischen Strom durch die Spule fließen, so wird das Weicheisenstück in sie hineingezogen. Stellt man zu Beginn der Justierung einen mittleren Strom ein, so kann einer Abwanderung der Nullage durch Vergrössern oder Vermindern des Spulenstromes entgegengewirkt werden. Dabei ist die Wirkung um so grösser, je geringer die Rückstellkräfte sind, das heisst, je kleiner die Eigenfrequenz des Pendels ist. Der Innenwiderstand der Spule beträgt 30Ω .

d) Die Verbindungen zwischen Schwinger und Rahmen

Wie Figur 2 zeigt, wird die elastische Verbindung zwischen dem Schwinger und dem Instrumentenrahmen durch zwei Federlamellen (1) gebildet, die nur auf Zug beansprucht werden. Die Zuführung des Erregerstromes zum elektromechanischen Umformer (vgl. 3a) erfolgt über zwei feine Bronzefedern (2). Eine weitere elastische Verbindung besteht noch in der Feder (3) der mechanischen Nullpunkt Korrektur.

e) Anschläge und Arretierung

Die Grösse der Bewegungen des Schwingers wird durch zwei Anschläge begrenzt. Die maximale Auslenkung beträgt ± 7 mm. Die Anschläge sind von der Drehachse des Pendels 21,0 cm entfernt. Da die reduzierte Pendellänge nur 19,4 cm beträgt, muss bei der Bestimmung der dynamischen Vergrößerung durch Auslenkung des Schwingers bis an die Anschläge (zum Beispiel durch Neigen des Seismometers) die Verschiebung des Schwingers, gemessen auf der Höhe der Anschläge, um 1,08 reduziert werden. Bei sehr raschen (rasch im Vergleich zur Eigenfrequenz des Pendels) Schwingungen des Gestells ist nämlich die

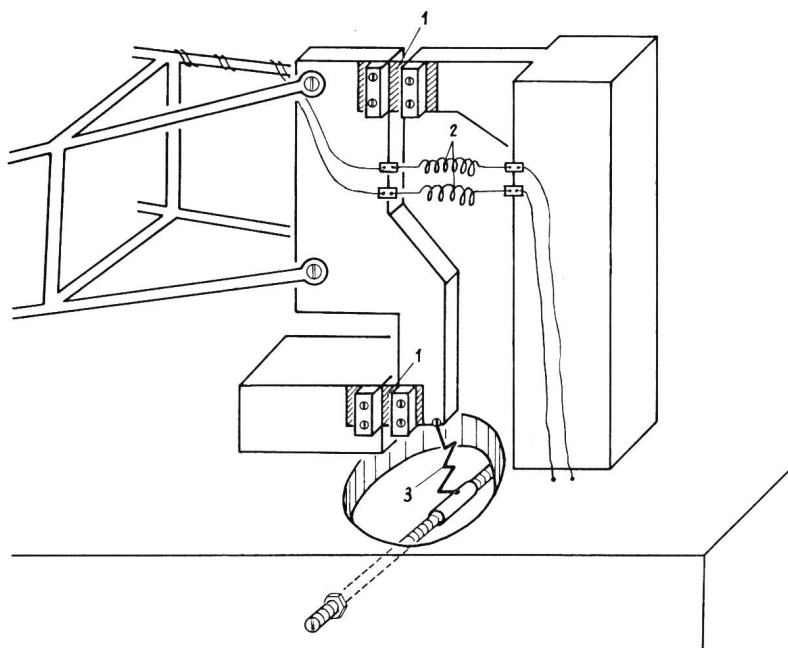


Fig. 2.

Verbindungen zwischen Schwinger und Rahmen beim Horizontalpendel

- 1 = Federlamellen
2 = Bronzefederchen
3 = Feder zur Nullpunkt-Korrektur

Amplitude des Schwingers, gemessen auf der Höhe der Anschläge, 1,08mal grösser als die Amplitude des Gestells in der Arbeitsrichtung des Pendels.

Der Schwinger kann durch Hineindreuen einer Schraube, deren Kopf auf den Erregerteil des elektromechanischen Umformers stösst, festgeklammert werden.

f) Grundplatte, Schutzdeckel

Die Grundplatte des Seismometers besteht aus Al-Spritzguss. Die dreieckige, massive Platte steht auf drei Stellschrauben (vgl. Fig. 3). Der Schwinger sowie alle empfindlichen Teile des Rahmens sind durch eine abnehmbare Haube aus Stahlblech geschützt. Ein solider Traggriff erlaubt einen mühelosen Transport. Mehrere Schaltelemente sind unter der Grundplatte angebracht und nach dem Wegnehmen einer dünnen Bodenplatte leicht zugänglich. Die Abmessungen des Pendels betragen (vgl. Fig. 3): $l = 45$ cm, $b = 30$ cm und für die Höhe 25 cm. Das Gewicht beträgt 6,5 kg.*

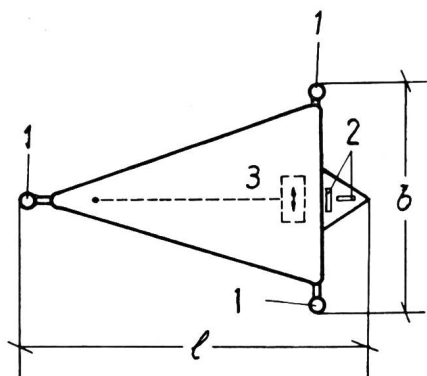


Fig. 3. Schematischer Grundriss des Horizontalpendels

1. Stellschrauben
2. Libellen
3. Schwinger

4. Mechanische Eigenschaften der Horizontalpendel

a) Die Periode der ungedämpften freien Schwingungen

Die Horizontalpendel stellen physische Pendel dar, die aber nicht kräftefrei gelagert sind, sondern mit Federlamellen, die ein merkliches Drehmoment aufweisen (vgl. 3d). Die auf Amplitude Null reduzierte Periode eines solchen Pendels beträgt:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\theta}{D + mgs \sin \varphi}}$$

Dabei bedeutet:

- T = Periode (Schwingungsdauer),
 θ = Trägheitsmoment des Pendels in bezug auf die Drehachse,
 D = Direktionsmoment der Federlamellen pro Ausschlagswinkel 1,
 m = Pendelmasse,
 g = Erdbeschleunigung,
 s = Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse,
 φ = Winkel zwischen der vertikalen und der Drehachse.

Alle Grössen sollen in Einheiten des CGS-Systems gemessen werden.

b) Die Bestimmung des Trägheitsmomentes

Die Bestimmung des Trägheitsmomentes geschah in der Weise, dass zwei Zusatzfedern bekannter Stärke zwischen Schwinger und Rahmen in der Arbeitsrichtung des Pendels angebracht wurden. Der Abstand der Angriffspunkte beidseits des Schwingers von der Drehachse sei mit a bezeichnet. Betragen die Federkonstanten der benutzten Federn f und f' , so erhält man für die Periode der freien Schwingungen:

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{\theta}{D + D' + mgs \sin \varphi}}$$

mit

$$D' = a^2 (f + f').$$

Werden die Versuche bei konstantem φ mit (T') und ohne (T) Zusatzfedern ausgeführt, so erhält man für θ :

$$\theta = \frac{D'}{4\pi^2 \left(\frac{1}{T'^2} - \frac{1}{T^2} \right)}$$

Es wurden folgende Werte gefunden:

X-Pendel: $\theta = 0,24 \pm 0,01 \cdot 10^6$ (CGS)

Y-Pendel: $\theta = 0,26 \pm 0,01 \cdot 10^6$ (CGS)

c) Die Bestimmung der Pendelmasse und des Schwerpunktabstandes

Die Pendel wurden demontiert und durch Wägen die Masse m und durch Ausbalancieren auf einer Schneide der Schwerpunktabstand s bestimmt. Es ist:

X-Pendel: $m = 756 \pm 1$ (g)

$s = 17,0 \pm 0,2$ (cm)

Y-Pendel: $m = 758 \pm 1$ (g)

$s = 17,0 \pm 0,2$ (cm)

d) Die Bestimmung des Direktionsmomentes der Federlamellen

Ist die Drehachse des Pendels vertikal, also $\varphi = 0$, so lautet die Gleichung zur Berechnung der Schwingungsdauer:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{\theta}{D}}$$

Daraus ergibt sich für D :

$$D = \frac{4\pi^2 \theta}{T^{*2}}$$

Da T^* infolge der Unsicherheit der Lage der Drehachse in den Federgelenken nur auf etwa 3% genau bestimmt werden konnte, beträgt die Fehlergrenze für D etwa 10%, da θ auch nur auf 4% genau bestimmt werden konnte. Es ergaben sich folgende Werte:

X-Pendel: $D = 3,2 \pm 0,3 \cdot 10^6$ (CGS)

entsprechend $T^* = 1,7$ s

Y-Pendel: $D = 2,3 \pm 0,2 \cdot 10^6$ (CGS)

entsprechend $T^* = 2,1$ s.

e) Die Variation der Schwingungsdauer

Wird das Pendel mit horizontaler Drehachse schwingen gelassen ($\varphi = 90^\circ$), so erhält man die kürzeste Schwingungsdauer (T^{**}), die ohne Verwendung von Zusatzfedern erreicht werden kann. Die Formel für T^{**} lautet:

$$T^{**} = 2\pi \sqrt{\frac{\theta}{D + mgs}}$$

Es wurden folgende Werte gefunden:

| | T^{**} (berechnet) | T^{**} (experimentell ermittelt) |
|----------|-------------------------|--|
| X-Pendel | 0,77 s | 0,78 s |
| Y-Pendel | 0,83 s | 0,82 s |

In der Praxis wird man nie kürzere Schwingungsdauern dadurch zu erreichen suchen, dass man die Drehachse horizontal stellt, weil in dieser Lage der Rahmen nur mit Hilfe von Stativen auf den Untergrund abgestellt werden kann. Viel praktischer und auch wirksamer ist das Anbringen von Zusatzfedern (vgl. 4b). Auf diese Art kann die Periode leicht auf 0,1 s herabgesetzt werden. Bei vertikaler Lage der Drehachse beträgt die Periode etwa 2 s (vgl. 4d). Eine weitere Erhöhung der Periode kann dadurch erreicht werden, dass man das Seismometer derart neigt, dass φ negativ wird. Schwingungsdauern über 6 s sind, wie Versuche gezeigt haben, für einen längeren Betrieb nicht mehr geeignet, da die Nullpunktverschiebung infolge der Unstabilität der Aufstellung und insbesondere wegen des Temperaturgangs zu gross wird.

5. Der Aufbau des Vertikalpendels

a) Der elektromechanische Umformer

Der elektromechanische Umformer ist im Prinzip derselbe wie bei den Horizontalpendeln. Ein Unterschied besteht in der Art der Anordnung. Beim Vertikalpendel ist das magnetische System fest mit dem Rahmen verbunden, während der Spulenträger mit der Signalwicklung einen Teil des Schwingers bildet (vgl. Fig. 4).

b) Die Dämpfung

Das Vertikalpendel besitzt nur eine elektromagnetische Wirbelstrombremse (vgl. 3b). Der Widerstand der Erregerwicklung beträgt 6 Ω . Für γ wurden aus Abklingversuchen folgende Werte gefunden:

| Dämpfungsart | γ (Z-Pendel) |
|---|------------------------|
| | (CGS) |
| Ohne spezielle Dämpfung | 0,022 |
| Wirbelstrombremsung: Erregung 0,5 A . . . | 0,364 |
| Wirbelstrombremsung: Erregung 1,0 A . . . | 1,32 |

Mit 1 A Erregerstrom ist das Gebiet der Sättigung erreicht.

c) Die Nullpunktregulierung

Die Nulllage des Schwingers kann auf drei verschiedene Arten beeinflusst werden (vgl. Fig. 4):

1. durch Drehen des Seismometers um eine zur Drehachse des Pendels parallele Achse;
2. durch Betätigung der Schraube (8) oder (5);
3. durch eine elektromagnetische Feinregulierung.

Zu Beginn einer Messung wird eine am Gestell befestigte Dosenlibelle eingespielt. Eine Feinregulierung ist mit Hilfe der Schraube (8) möglich, da der Hebel (7) die Wirkung der Bewegungen der Schraube (8) stark herabsetzt. Wird letztere zum Beispiel hineingeschraubt (Bewegung des Schraubenkopfes gegen die Pendelachse), so wird die Kugel (6) und damit der Hebel (10) etwas gehoben. Dadurch, dass sich das Lager der Schraubenfeder (2) am Hebel (10) im Uhrzeigersinne etwas dreht, wird die

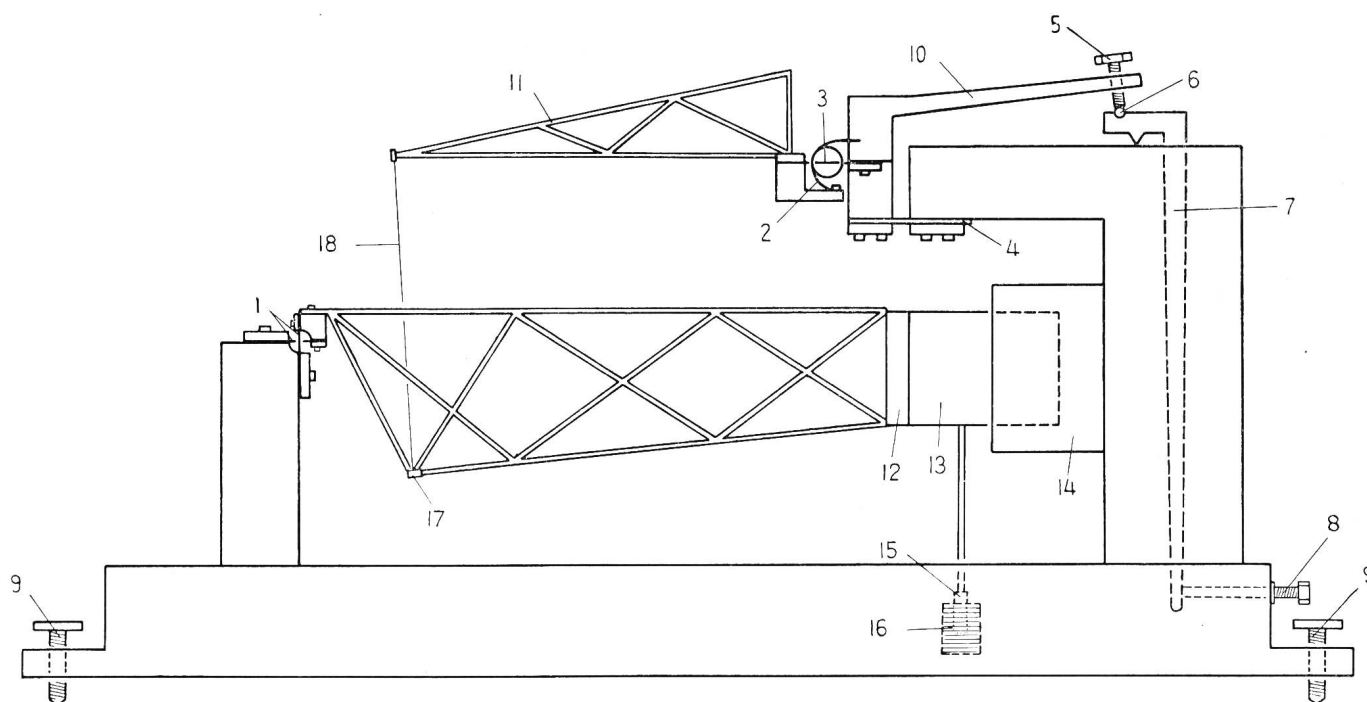


Fig. 4. Schematische Darstellung des Vertikalpendels

- | | | |
|-----------------------|---|---|
| 1 = Federlamellen | 9 = Stellschraube | 14 = Magnetsystem des elektromechanischen Umformers |
| 2 = Schraubenfeder | 10 = Hebel | 15 = Eisenstäbchen |
| 3 = Federlamelle | 11 = Joch | 16 = Spule (hohl) |
| 4 = Stahllamelle | 12 = Masse | 17 = Schlitten |
| 5 = Stellschraube | 13 = Spulenträger des elektromechanischen Umformers | 18 = Stahldraht |
| 6 = Lagerkugel | | |
| 7 = Übertragungshebel | | |
| 8 = Stellschraube | | |

Spannung der tordierten Feder (2) etwas vermindert. Dies hat eine Abwärtsbewegung des Pendels zur Folge, bis die Kräfte wieder im Gleichgewicht sind. Ein Drehen der Schraube (5) wirkt in analoger Weise, bloss sind dort die Bewegungen viel stärker wirksam (Grobeinstellung). Schliesslich ist auch noch eine elektromagnetische Feinregulierung eingebaut, bestehend aus dem Weicheisenstäbchen (15) und der hohlen Spule (16), die einen Innenwiderstand von 10 Ω aufweist. Fliesst durch (16) ein Strom, so wird das Stäbchen, je nach der Intensität der Erregung, mehr oder weniger stark in die Spule gezogen.

d) Die Verbindungen zwischen Schwinger und Rahmen

Die Drehachse des Vertikalpendels wird durch zwei Kreuzgelenke gebildet [vgl. Fig. 4 (1)]. In der Nähe der Drehachse werden auch die beiden Zuleitungsdrähte der Signalwicklung des elektromechanischen Umformers mit Hilfe von Bronzefederchen auf den Rahmen hinübergeführt (in Fig. 4 nicht eingezeichnet). Die Schraubenfeder (2) überträgt ihre Spannung auf das Joch (11), das über die Federlamelle (3) mit dem Rahmen und über den Stahldraht (18) mit dem Hauptteil des Schwingers verbunden ist, der im folgenden «Gehänge» genannt werden soll. Der Schwinger des Vertikalpendels besteht demnach aus dem Joch und dem Gehänge.

e) Anschläge und Arretierung

Auf der Höhe des massiven Messingkörpers [vgl. Fig. 4 (12)] sind zwei verstellbare Anschläge angebracht. Ihr Abstand von der Drehachse des Pendels beträgt 15,7 cm. Da die reduzierte Pendellänge 13,7 cm beträgt, ist die dynamische Vergrösserung für ein Teilchen, das 15,7 cm von der Drehachse entfernt ist, 1,13, was bei Eichungen mit Hilfe einer statischen Auslenkung bis zum Anschlag berücksichtigt werden muss (vgl. auch 3e). Die maximale Auslenkung des Gehänges, gemessen auf der Höhe der Anschläge, beträgt ± 6 mm.

Die Arretierung wird beim Vertikalpendel dadurch erreicht, dass ein federnder Bügel das Gehänge gegen den oberen Anschlag presst.

f) Grundplatte, Schutzdeckel

Die Ausführung dieser Teile entspricht genau derjenigen bei den Horizontalpendeln (vgl. 3f).

Die Dimensionen des Vertikalpendels (vgl. Fig. 5) betragen:

$l = 37$ cm, $b = 29$ cm und $h = 26$ cm. Das Gewicht beträgt 7,9 kg.*

6. Mechanische Eigenschaften des Vertikalpendels

a) Die Bestimmungsstücke

Der Aufbau des Pendels ist in Figur 6 nochmals schematisiert dargestellt.

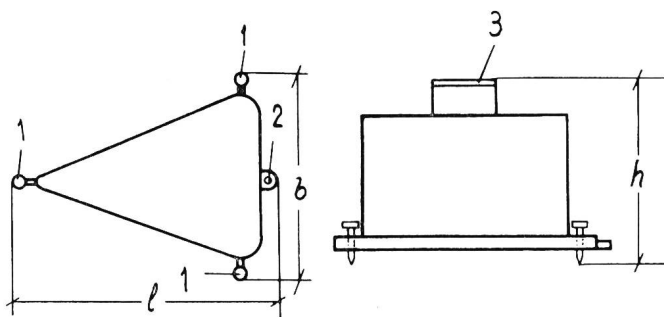


Fig. 5. Schematischer Grund- und Aufriss des Vertikalpendels

1. Stellschrauben
2. Dosenlibelle
3. Traggriff

Abgesehen von der Geometrie des Pendels (vgl. dazu 8) sind folgende Größen zu bestimmen: das Trägheitsmoment θ des Gehänges (5) in bezug auf die Drehachse (1), das Direktionsmoment je Einheitswinkel D der Federlamellen bei (1), die Masse m des Gehänges (5), der Abstand s des Schwerpunkts des Gehänges (5) von der Drehachse bei (1) (Schwerpunkt und Drehachse liegen auf gleicher Höhe), das Trägheitsmoment θ' des Jochs (4) in bezug auf die Drehachse (2), das Direktionsmoment je Einheitswinkel D' der Schraubenfeder (3), inklusive desjenigen der Federlamellen (2), die Masse m' des Jochs (4) und der Abstand s' des Schwerpunkts des Jochs (4) von der Drehachse (2).

b) Die Bestimmung des Trägheitsmomentes des Gehänges

Die Bestimmung des Trägheitsmomentes wurde in analoger Weise wie bei den Horizontalpendeln durchgeführt (vgl. 4b). Aus Beobachtungen der Schwingungsdauer wurde für θ der Wert

$$\theta = (43 \pm 1) \cdot 10^3 \text{ (CGS)}$$

gefunden.

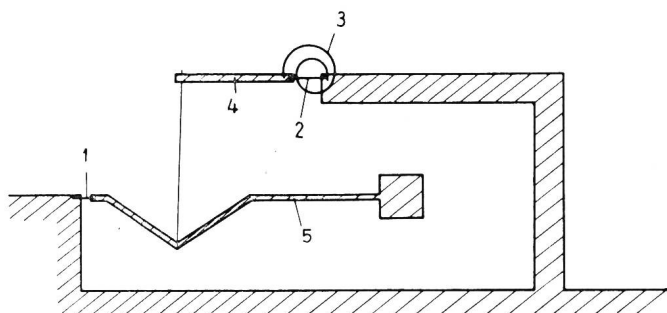


Fig. 6. Prinzipschema der Aufhängung des Schwingers im Rahmen beim Vertikalpendel

- 1 = Federlamelle
- 2 = Federlamelle
- 3 = Schraubenfeder
- 4 = Joch
- 5 = Gehänge

c) Die Bestimmung des Direktionsmomentes der Federlamellen, die die Drehachse des Gehänges festlegen

Die Bestimmung des Direktionsmomentes der Kreuzgelenke erfolgte durch genaues Vertikalstellen der Drehachse und Beobachtung der Schwingungsdauer (analog 4d). Es wurde gefunden:

$$D = (0,31 \pm 0,02) \cdot 10^6 \text{ (CGS)}.$$

d) Die Bestimmung der Gehängemasse und des Schwerpunktabstandes

Die Masse m des Gehänges und der Schwerpunktabstand s wurden am ausgebauten Pendel durch Wägen, bzw. Ausbalancieren auf einer Schneide bestimmt. Es wurde gefunden:

$$m = 332 \pm 1 \text{ (g)}$$

$$s = 9,3 \pm 0,2 \text{ (cm)}.$$

e) Die Bestimmung des Trägheitsmomentes des Jochs

Zu diesem Zweck wurde das Joch mit einer zylindrischen Zusatzmasse versehen, deren Trägheitsmoment in bezug auf die Drehachse berechnet werden konnte. Das Gewicht der Masse wurde so gewählt, dass das System Joch plus Zusatzmasse frei schwingen konnte, nachdem die Verbindung mit dem Gehänge entfernt worden war. Aus der Schwingungsdauer kann θ' ermittelt werden, wenn D' bekannt ist (vgl. den folgenden Abschnitt). Es ergab sich:

$$\theta' = (10 \pm 5) \cdot 10^6 \text{ (CGS)}.$$

f) Die Bestimmung des Direktionsmomentes der Verbindungen zwischen dem Joch und dem Instrumentenrahmen

Es wurde an der Spitze des Jochs, als dessen Verlängerung, ein starrer Zeiger montiert. So konnte mit genügender Genauigkeit direkt die Drehung des Jochs mit zunehmender Belastung bestimmt werden.

Es ergab sich:

$$D' = (12 \pm 1) \cdot 10^6 \text{ (CGS)}.$$

g) Die Bestimmung der Vorspannung der Schraubenfeder

Mit Hilfe der voranstehend beschriebenen Anordnung zur Bestimmung von D' wurde auch die Vorspannung der Schraubenfeder bestimmt. Diese kann zur Nullpunktverschiebung (vgl. 5c) um ca. $\pm 100 \text{ g}^*$ geändert werden.

Im Mittel ist $P = 1200 \text{ (g}^*)$.

h) Die Bestimmung der Masse des Jochs und des Schwerpunktabstandes

Die Masse m' und der Abstand s' des Schwerpunktes von der Drehachse des Jochs wurden bei demontiertem Joch bestimmt. Die Massenverteilung ist so gehalten, dass der Schwerpunkt gerade mit der Drehachse zusammenfällt. Es ist:

$$m' = 320 \pm 5 \text{ (g)}$$

$$s' = 0,0 \pm 0,2 \text{ (cm)}.$$

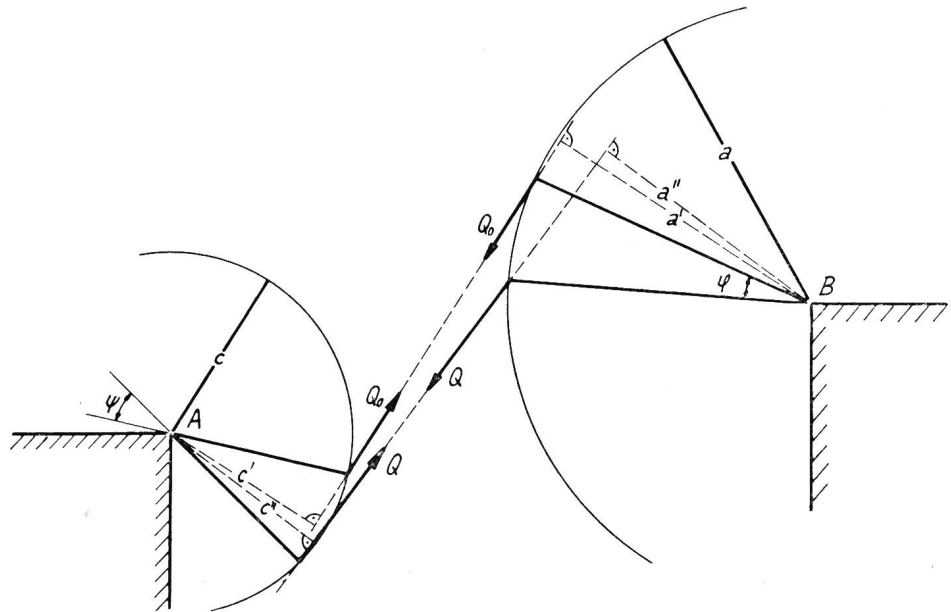


Fig. 7.

Verhältnis der Bewegungen von Joch (Drehpunkt bei B) und Gehänge (Drehpunkt bei A)

Die Unsicherheit der Bestimmung von m' ist durch die Schwierigkeit einer genauen Abschätzung der geklemmten Teile der Federn bedingt.

7. Die Theorie des Vertikalpendels

Es soll die theoretische Eigenfrequenz des ungedämpften Pendels ermittelt werden.

Wir nehmen zunächst an, die Verbindung zwischen dem Gehänge und dem Joch, die in Wirklichkeit durch einen dünnen Stahldraht hergestellt ist, sei unterbrochen. Lassen wir am Gehänge eine Kraft Q angreifen (vgl. Fig. 7), die in Grösse und Richtung immer gleich derjenigen sein soll, die normalerweise mit Hilfe des Stahldrahtes vom Joch auf das Gehänge übertragen wird, so erhält man unter der tatsächlich erfüllten Voraussetzung, dass der Schwerpunkt des Gehänges auf gleicher Höhe wie die Drehachse liegt, folgende Differentialgleichungen für das frei schwingende Gehänge:

$$\theta \ddot{\psi} - m s g + Q c'' + D \psi = 0. \quad (1)$$

Die Bedeutung der Buchstaben ist aus Figur 6 und Abschnitt 6a ersichtlich.

Schreibt man in linearer Näherung für Q :

$$Q = Q_0 + M \psi \quad (2)$$

und für c'' :

$$c'' = c' - U \psi \quad (3)$$

so folgt:

$$\theta \ddot{\psi} - m s g + (Q_0 + M \psi) (c' - U \psi) = 0.$$

Multipliziert man aus und vernachlässigt das Glied mit ψ^2 , was für kleine Bewegungen erlaubt ist, so erhält man:

$$\theta \ddot{\psi} - m s g + Q_0 c' + \psi (M c' - U Q_0 + D) = 0. \quad (4)$$

Für die Ruhelage ist $\psi = \dot{\psi} = 0$, woraus folgt:

$$-m s g + Q_0 c' = 0 \quad (5)$$

Subtrahiert man (5) von (4), so erhält man:

$$\theta \ddot{\psi} + \psi (M c' - U Q_0 + D) = 0. \quad (6)$$

Die Differentialgleichung für freie Schwingungen des Jochs lautet (analog zu (1) ist vorausgesetzt, dass Schwerpunkt und Drehachse des Jochs auf gleicher Höhe liegen):

$$\theta' \ddot{\varphi} - m' s' g - Q a'' + D' \varphi + D' \Lambda = 0. \quad (7)$$

Λ ist der Vorspannwinkel der Torsionsfeder. Die Bedeutung der übrigen Buchstaben ist aus Fig. 6 und Abschnitt 6a ersichtlich.

Setzt man näherungsweise für Q :

$$Q = Q_0 + N \varphi \quad (8)$$

so folgt aus (2):

$$\frac{\varphi}{\psi} = \frac{M}{N} = C. \quad (9)$$

Setzt man ferner:

$$a'' = a' + V \psi \quad (10)$$

so folgt:

$$\theta' C \ddot{\psi} - m' s' g - (Q_0 + M \psi) (a' + V \psi) + D' C \psi + D' \Lambda = 0.$$

Multipliziert man aus, so erhält man unter Vernachlässigung des Gliedes mit ψ^2 :

$$\theta' C \ddot{\psi} + \psi (-M a' - V Q_0 + D' C) - m' s' g - Q_0 a' + D' \Lambda = 0. \quad (11)$$

Für die Ruhelage ist $\psi = \dot{\psi} = 0$ und damit

$$-m' s' g - Q_0 a' + D' \Lambda = 0. \quad (12)$$

Subtrahiert man (12) von (11), so folgt:

$$\theta' C \ddot{\psi} + \psi (-M a' - V Q_0 + D' C) = 0. \quad (13)$$

Multipliziert man (13) mit $\frac{c'}{a'}$ und addiert zu (6), so erhält man:

$$\ddot{\psi} \left(\theta + \theta' C \frac{c'}{a'} \right) + \psi \left[Q_0 \left(-U - V \frac{c'}{a'} \right) + D + D' C \frac{c'}{a'} \right] = 0. \quad (14)$$

Aus der Geometrie des Pendels müssen nun die Grössen C , U und V ermittelt werden.

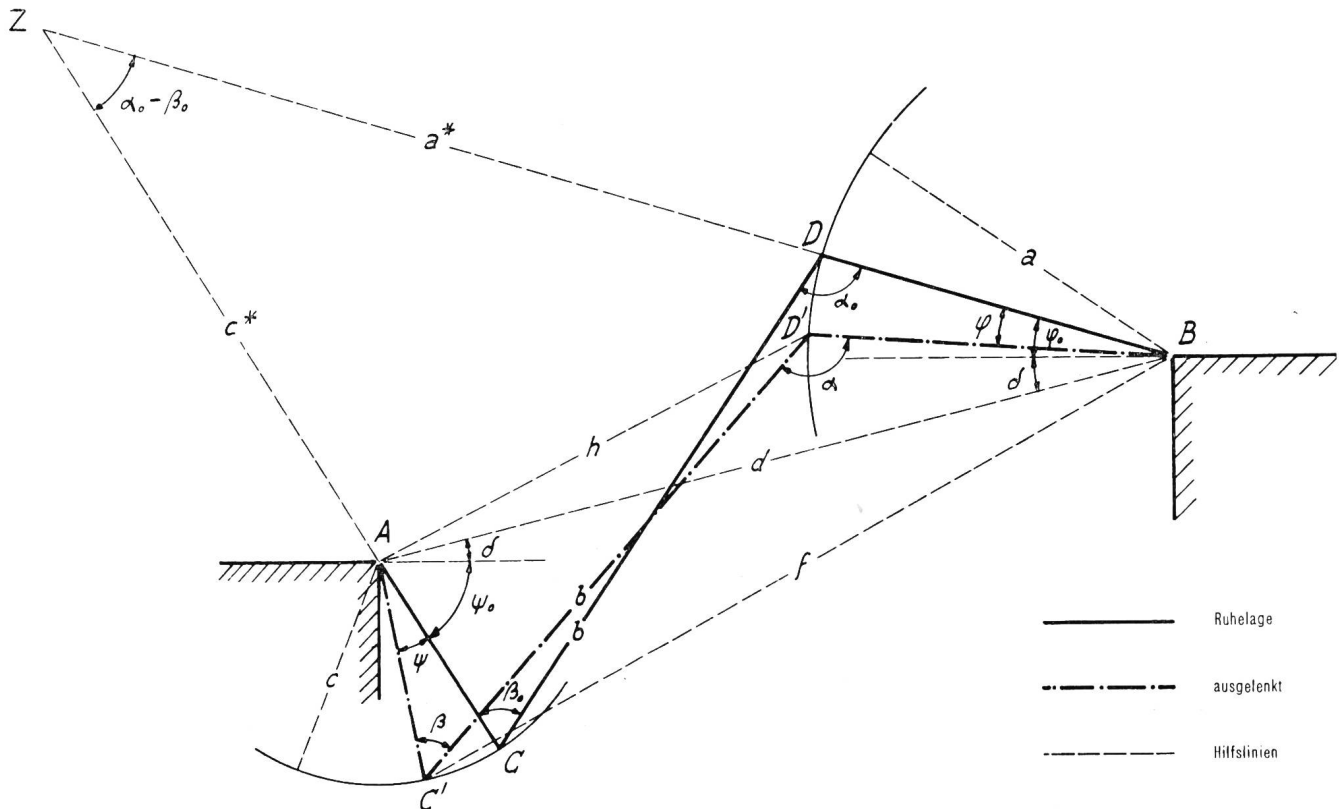


Fig. 8. Geometrie des Schwingers

Die Bestimmung von C ist einfach, wenn das momentane Drehzentrum Z (vgl. Fig. 8) eingeführt wird, um das sich die Strecke b um den kleinen Winkel χ dreht. Es ist:

$$\begin{aligned} (c^* + c) \chi &= c \psi \\ \text{und} \\ a^* \chi &= a \varphi \\ \text{woraus folgt: } \frac{\varphi}{\psi} = C &= \frac{a^* c}{a (c^* + c)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Für das Dreieck CDZ erhält man durch Anwendung des Sinussatzes:

$$a^* = \frac{(c^* + c) \sin \beta_0}{\sin \alpha_0}.$$

In (15) eingesetzt (vgl. auch Fig. 7) erhält man:

$$\frac{\varphi}{\psi} = C = \frac{c \sin \beta_0}{a \sin \alpha_0} = \frac{c'}{a'}. \quad (16)$$

Wendet man im Dreieck $AC'B$, bzw. im Dreieck $BD'C'$ den Kosinussatz an, so erhält man folgende Ausdrücke:

$$c^2 + d^2 - 2cd \cos (\psi_0 + \psi + \delta) = f^2$$

und

$$a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha = f^2$$

woraus folgt:

$$\cos \alpha = \frac{a^2 + b^2 - c^2 - d^2 + 2cd \cos (\psi_0 + \psi + \delta)}{2ab}. \quad (17)$$

Entwickelt man nach ψ und bricht nach dem linearen Glied ab, so erhält man:

$$\cos \alpha (\psi) = \cos \alpha_0 - \frac{cd}{ab} \sin (\psi_0 + \delta) \cdot \psi. \quad (18)$$

Für $\sin \alpha (\psi)$ erhält man nach der Beziehung

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}:$$

$$\sin \alpha (\psi) = \sqrt{1 - \left[\cos \alpha_0 - \frac{cd}{ab} \sin (\psi_0 + \delta) \cdot \psi \right]^2},$$

oder, bei Vernachlässigung des Gliedes mit ψ^2 :

$$\begin{aligned} \sin \alpha (\psi) &= 1 - \cos^2 \alpha_0 + \frac{2cd}{ab} \cos \alpha_0 \sin (\psi_0 + \delta) \cdot \psi \\ &= \sin \alpha_0 \sqrt{1 + \frac{2cd}{ab} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\sin^2 \alpha_0} \cdot \sin (\psi_0 + \delta) \cdot \psi}. \end{aligned}$$

Entwickelt man die Wurzel wieder nach der klei-

nen Grösse ψ mit $\sqrt{1 + x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 \dots$

und bricht nach dem linearen Glied ab, so erhält man:

$$\sin \alpha (\psi) = \sin \alpha_0 + \frac{cd}{ab} \cot \alpha_0 \sin (\psi_0 + \delta) \cdot \psi. \quad (19)$$

Gleichung (19) enthält noch Grössen, die voneinander abhängen. Es soll daher der Ausdruck $c \sin (\psi_0 + \delta)$ durch andere Grössen ersetzt werden.

Zunächst wird im Dreieck ABZ der Sinussatz angewendet. Man erhält:

$$d \sin (\psi_0 + \delta) = (a^* + a) \sin (\alpha_0 - \beta_0). \quad (20)$$

Ferner ist (Sinussatz im Dreieck ZCD):

$$\frac{a^*}{b} = \frac{\sin \beta_0}{\sin (\alpha_0 - \beta_0)}.$$

Damit erhält man mit (20):

$$d \sin (\varphi_0 + \delta) = b \sin \beta_0 + a \sin (\alpha_0 - \beta_0). \quad (21)$$

Setzt man (21) in (19) ein, so erhält man:

$$\sin \alpha (\varphi) = \sin \alpha_0 + \frac{c}{a b} \operatorname{ctg} \alpha_0 [a \sin (\alpha_0 - \beta_0) + b \sin \beta_0] \varphi. \quad (22)$$

Wie aus Figur 7 sofort zu erkennen ist, gilt:

$$a'' = a \sin \alpha.$$

Zusammen mit (22) erhält man für a'' :

$$\begin{aligned} a'' &= a \sin \alpha_0 + \frac{c}{b} \operatorname{ctg} \alpha_0 [a \sin (\alpha_0 - \beta_0) + b \sin \beta_0] \varphi \\ &= a' + \frac{c}{b} \operatorname{ctg} \alpha_0 [a \sin (\alpha_0 - \beta_0) + b \sin \beta_0] \varphi. \end{aligned} \quad (23)$$

Vergleicht man (23) mit (10), so wird:

$$V = \frac{c}{b} \operatorname{ctg} \alpha_0 [a \sin (\alpha_0 - \beta_0) + b \sin \beta_0]. \quad (24)$$

Wendet man den Kosinussatz auf das Dreieck BD'A bzw. das Dreieck AC'D' an, so wird:

$$a^2 + d^2 - 2 a d \cos (\varphi_0 + \delta - \varphi) = h^2$$

und

$$c^2 + b^2 - 2 c b \cos \beta = h^2$$

woraus folgt:

$$\cos \beta = \frac{c^2 + b^2 - a^2 - d^2 + 2 a d \cos (\varphi_0 + \delta - \varphi)}{2 c b}. \quad (25)$$

Entwickelt man nach φ und bricht nach dem linearen Glied ab, so erhält man:

$$\cos \beta (\varphi) = \cos \beta_0 + \frac{a d}{c b} \sin (\varphi_0 + \delta) \varphi. \quad (26)$$

Der Übergang zu der Sinusfunktion geschieht ganz analog zum Übergang von Gleichung (18) zu Gleichung (19) und man erhält:

$$\sin \beta (\varphi) = \sin \beta_0 - \frac{a d}{c b} \operatorname{ctg} \beta_0 \sin (\varphi_0 + \delta) \varphi. \quad (27)$$

Die Gleichung (27) ist noch überbestimmt. Es soll daher der Ausdruck $d \sin (\varphi_0 + \delta)$ eliminiert werden.

Der Sinussatz, angewendet auf das Dreieck BZA, liefert:

$$d \sin (\varphi_0 + \delta) = c^* \sin (\alpha_0 - \beta_0). \quad (28)$$

Ferner findet man durch Anwendung des Sinussatzes auf das Dreieck ZCD:

$$c^* = \frac{b \sin \alpha_0}{\sin (\alpha_0 - \beta_0)} - c.$$

In (28) eingesetzt erhält man so:

$$d \sin (\varphi_0 + \delta) = b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0). \quad (29)$$

Setzt man (29) in (27) ein, so folgt:

$$\sin \beta (\varphi) = \sin \beta_0 - \frac{a}{c b} \operatorname{ctg} \beta_0 [b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0)] \varphi \quad (30)$$

oder als Funktion von φ unter Berücksichtigung von (16):

$$\sin \beta (\varphi) = \sin \beta_0 - \frac{1}{b \sin \alpha_0} \left[b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0) \right] \varphi. \quad (31)$$

Ferner ist (vgl. Fig. 7):

$$c'' = c \sin \beta.$$

Zusammen mit (31) erhält man damit:

$$\begin{aligned} c'' &= c \sin \beta_0 - \frac{c \cos \beta_0}{b \sin \alpha_0} \left[b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0) \right] \varphi \\ &= c' - \frac{c \cos \beta_0}{b \sin \alpha_0} \left[b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0) \right] \varphi. \end{aligned} \quad (32)$$

Vergleicht man (32) mit (3) so wird:

$$U = \frac{c}{b} \cdot \frac{\cos \beta_0}{\sin \alpha_0} \left[b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0) \right]. \quad (33)$$

Man erhält somit für C , U und V folgende Ausdrücke:

$$C = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{c \sin \beta_0}{a \sin \alpha_0} = \frac{c'}{a'} \quad (16)$$

$$U = \frac{c}{b} \cdot \frac{\cos \beta_0}{\sin \alpha_0} \left[b \sin \alpha_0 - c \sin (\alpha_0 - \beta_0) \right] \quad (33)$$

$$V = \frac{c}{b} \operatorname{ctg} \alpha_0 \left[a \sin (\alpha_0 - \beta_0) + b \sin \beta_0 \right]. \quad (24)$$

Unter Benutzung von Gleichung (16) lässt sich die Bewegungsgleichung (14) noch etwas vereinfachen zu:

$$\ddot{\psi} (\theta + \theta' C^2) + \psi [Q_0 (-U - VC) + D + D' C^2] = 0. \quad (34)$$

Damit erhält man für die gesuchte Kreisfrequenz der ungedämpften Eigenschwingung:

$$\nu = \sqrt{\frac{Q_0 (-U - VC) + D + D' C^2}{\theta + \theta' C^2}}. \quad (35)$$

Diskussion von Gleichung (35)

Nimmt man zunächst einmal an $U = V = 0$, was eintritt, falls $\alpha_0 = \beta_0 = 90^\circ$ ist, so erhält man für die Kreisfrequenz ν des nicht astasierten Pendels:

$$\nu = \sqrt{\frac{D + D' C^2}{\theta + \theta' C^2}}. \quad (36)$$

Der Ausdruck für C vereinfacht sich zu:

$$C = \frac{c}{a}. \quad (37)$$

Die Astasierung wird dargestellt durch:

$$A = Q_0 (-U - VC). \quad (38)$$

Sie ist also proportional zur Vorspannung Q_0 .

Der Ausdruck für U besteht nach (33) aus zwei Produkten mit dem gemeinsamen Faktor $\frac{c}{b} \cdot \frac{\cos \beta_0}{\sin \alpha_0}$. α_0 kann Werte zwischen 0° und 180° annehmen, das heisst $\sin \alpha_0$ liegt zwischen 0 und 1 (vgl. Fig. 9a

und 9c). Sowohl für $\alpha_0 = 0^\circ$, als auch für $\alpha_0 = 180^\circ$ wird U unendlich gross.

Für $0 < \beta_0 < 90^\circ$ wird $U = +\infty$, falls $\alpha_0 = 0^\circ$ ist, und $U = -\infty$, wenn $\alpha_0 = 180^\circ$ ist. Für den Fall $90^\circ < \beta_0 < 180^\circ$ wird $U = -\infty$, falls $\alpha_0 = 0^\circ$ ist, und $U = +\infty$, falls $\alpha_0 = 180^\circ$ ist. U wird Null, falls $\beta_0 = 90^\circ$ oder $b \sin \alpha_0 = c \sin (\alpha_0 - \beta_0)$ ist.

V besteht aus zwei Produkten mit dem gemeinsamen Faktor $\frac{c}{b} \operatorname{ctg} \alpha_0$. V verschwindet, falls $\alpha_0 = 90^\circ$ oder wenn $a \sin (\beta_0 - \alpha_0) = b \sin \beta_0$ ist. Solange die Lagerstelle A tiefer liegt als diejenige bei B , folgt für $\alpha_0 = 0^\circ$ notwendigerweise: $b > a$.

Damit wird $V = +\infty$, wenn $\alpha_0 = 0^\circ$ ist, und $V = -\infty$, wenn $\alpha_0 = 180^\circ$ ist.

C verschwindet, falls $\beta_0 = 0^\circ$ oder $\beta_0 = 180^\circ$ ist. Für $\alpha_0 = 0^\circ$ und $\alpha_0 = 180^\circ$ wird der Wert von C $+\infty$.

Eine besonders starke Astasierung würde somit eine Konstruktion mit $\beta_0 < 90^\circ$ und $\alpha_0 \sim 0^\circ$ aufweisen. Diese Lösung wäre auch insofern interessant, als das Lager B durch eine Blattfeder gebildet werden könnte, die zur Hauptsache nur auf Zug beansprucht würde (vgl. Fig. 9b).

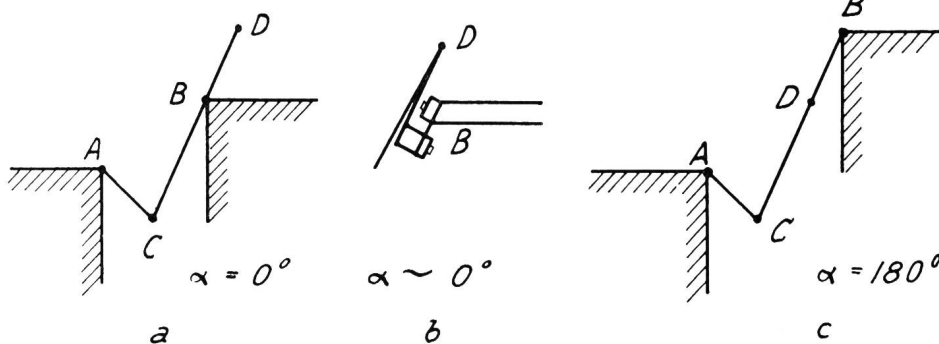


Fig. 9
Spezialfälle der Aufhängung des Schwingers im Rahmen

8. Die numerische Auswertung

Einer direkten Bestimmung am gebauten Seismometer sind die Grössen a , b und c am ehesten zugänglich (vgl. Fig. 4 und Fig. 8). Bei der Bestimmung von a und c besteht infolge der schlecht definierten Lage der Drehachsen in den durch Federlamellen gebildeten Gelenken eine Unsicherheit, der durch genügend grosse Fehlerschranken Rechnung getragen werden muss.

Da aus konstruktiven Gründen die Halterung, in welche der das Joch mit dem Gehänge verbindende Stahldraht eingelötet wurde, gegenüber der Richtung des gespannten Drahtes etwas abgewinkelt ist, und da infolge der Steife des benutzten Drahtes nur ein allmählicher Übergang von der einen Richtung in die andere stattfindet (es fehlt eine scharfe Knickstelle an der Stelle des Kontaktes des freien Drahtes mit der Lotmasse), besteht auch in der Bestimmung von b eine gewisse Unsicherheit. Man erhält für $a = 10,7 \pm 0,3$ (cm), für $b = 8,1 \pm 0,1$ (cm) und für $c = 4,8 \pm 0,2$ (cm). Einigermassen genau kann auch α_0 er-

mittelt werden, für das der Wert $108^\circ \pm 3^\circ$ gemessen wurde.

β_0 kann direkt nur sehr ungenau bestimmt werden, ist aber leicht zu berechnen, wenn C bekannt ist.

C kann experimentell derart bestimmt werden, dass die Drehwinkel des Gehänges und des Jochs für eine bestimmte Auslenkung gemessen werden (z. B. nach der Drehspiegelmethode). Es wurde so gefunden: $C = 0,26 \pm 0,01$.

Mit (16) erhält man dann: $\sin \beta_0 = 0,551$ oder $\beta_0 = 33,5^\circ$.

Für die Grössen der Gleichung (35) erhält man folgende numerische Werte (CGS):

$$\begin{array}{llll} Q_0 = 11,4 \cdot 10^5 & CV = -0,74 & \theta & = 0,43 \cdot 10^5 \\ U = 1,60 & D = 3,1 \cdot 10^5 & \theta' & = 0,1 \cdot 10^5 \\ V = -2,84 & D' = 120 \cdot 10^5 & C^2 \theta' & = 0,01 \cdot 10^5 \\ C = 0,26 & C^2 D' & & = 8,1 \cdot 10^5 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} Q_0 (-U - VC) & = -9,8 \cdot 10^5 \\ D + D' C^2 & = 11,2 \cdot 10^5 \end{array}$$

Man erhält somit für die Kreisfrequenz:

$$\nu = \sqrt{\frac{1,4}{0,44}} = 1,8$$

und damit für die Periode T :

$$T = \frac{2\pi}{\nu} = 3,5 \text{ (s)}.$$

Experimentell wurde $T = 3,2$ (s) gefunden.

Die Fehlerschranke für die Grösse der Astasierung beträgt etwa 30 %, während $(D + C^2 D')$ auf etwa 10 % genau bestimmbar ist. Dadurch wird der Bereich der möglichen T -Werte sehr gross und umfasst auch negative Werte, so dass nur eine qualitative Überprüfung der theoretischen Ergebnisse möglich ist.

9. Die Variation der Schwingungsdauer beim Vertikalpendel

Die Variation der Schwingungsdauer geschieht durch Änderung der Geometrie, was eine Änderung der Astasierung bewirkt. Der Punkt D (vgl. Fig. 8) – dort ist der Stahldraht, der das Gehänge trägt, im Joch festgeklemmt – kann etwa 0,5 cm gehoben und gleich viel gegen die Achse des Jochs verschoben

werden. Ebenso kann der Punkt C – Klemmstelle des Stahldrahtes am Gehänge – mit Hilfe eines Schlittens etwa 1 cm horizontal verschoben werden. Durch Änderung der Vorspannung (vgl. 5c und Fig. 4) wird das Pendel jeweils wieder schwingfähig gemacht. Die Periode des Pendels kann so von 1,5 s bis zum instabilen Zustand vergrößert werden. Versuche ergaben eine praktische Brauchbarkeit bis zu einer Eigenperiode von etwa 5 s.

10. Dynamische Prüfungen auf dem Schütteltisch

a) Der Einfluss translatorischer Bewegungen senkrecht zur Arbeitsrichtung der Seismometer

Die Arbeitsrichtung eines Seismometers mit einem Freiheitsgrad ist unter anderem dadurch charakterisiert, dass das System für translatorische Bewegungen, deren Richtung senkrecht zur Arbeitsrichtung liegt, völlig unempfindlich ist. Es ist deshalb beispielsweise möglich, die Arbeitsrichtung des Vertikalpendels dadurch genau einzustellen, dass man das Seismometer auf einen Horizontal-Schütteltisch stellt und so lange die Lage des Rahmens ändert, bis das System auf horizontale Schwingungen nicht mehr anspricht. Ist dies der Fall, so werden die Libellen eingestellt, damit diese Lage jederzeit wieder hergestellt werden kann. Es zeigte sich bei diesen Versuchen, dass im ganzen Messbereich von etwa 0,2...60 Hz eine völlige Unempfindlichkeit der Seismometer gegenüber translatorischen Bewegungen senkrecht zur Arbeitsrichtung nicht erreicht werden konnte, was mit der nicht ideal starren Konstruktion zusammenhängt. Nach sorgfältigem Justieren betrug die Empfindlichkeit für solche Bewegungen im Maximum noch 0,3% der Empfindlichkeit für die gleichen Bewegungen in Arbeitsrichtung.

b) Störende Eigenfrequenzen

Dadurch, dass es praktisch nicht möglich ist, vollkommen starre Konstruktionen aufzubauen, stellen sowohl der Instrumentenrahmen als auch der Schwinger elastische Körper mit unendlich vielen Eigenfrequenzen dar. Durch sorgfältige Wahl der Materialien und durch die Verwendung von Gitterträgern wurde versucht, die Lage der tiefsten dieser Eigenfrequenzen soweit nach oben zu verschieben, dass sie nicht mehr stark stört.

Bei den Horizontalpendeln liegt die erste störende Resonanzfrequenz bei 80 Hz, beim Vertikalpendel bei 70 Hz. Weitere Resonanzen folgen bei beiden Pendeln in kurzen Intervallen.

c) Das Verhalten bei periodischen Störungen

Die Bewegung einer Pendelmassse gegenüber dem Gestell wird allgemein durch folgende Differentialgleichung dargestellt:

$$\ddot{u} + 2\gamma \dot{u} + \nu^2 u = f(t). \quad (39)$$

u ist der Ausschlag des Schwingungsmittelpunktes des Schwingers gegenüber dem Gestell, γ eine Dämpfungskonstante, ν die Kreisfrequenz der un-

gedämpften Eigenschwingungen. $f(t)$ ist die Störfunktion, die der eingepprägten Kraft proportional ist.

Für rein sinusförmige Bewegungen der Kreisfrequenz ω , wie sie ein Seismometer in guter Näherung auf einem Schütteltisch erfährt, lautet (39), falls die Amplitude C'_0 der Bewegung in Arbeitsrichtung des Seismometers konstant bleibt:

$$\ddot{u} + 2\gamma \dot{u} + \nu^2 u = C'_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t. \quad (40)$$

Die stationäre Lösung dieser Differentialgleichung (der Einschwingvorgang interessiert in diesem Zusammenhang nicht) lautet:

$$u(t) = C'_0 \frac{\bar{\omega}^2}{\sqrt{(1 - \bar{\omega}^2)^2 + 4\gamma^2 \bar{\omega}^2}} \sin(\omega t - \Phi) \quad (41)$$

mit $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\nu}$ und $\gamma = \frac{\gamma}{\nu}$.

Φ ist die Phasenverschiebung.

Für die Amplitude erhält man:

$$u_A = C'_0 \frac{\bar{\omega}^2}{\sqrt{(1 - \bar{\omega}^2)^2 + 4\gamma^2 \bar{\omega}^2}} = C'_0 \Omega. \quad (42)$$

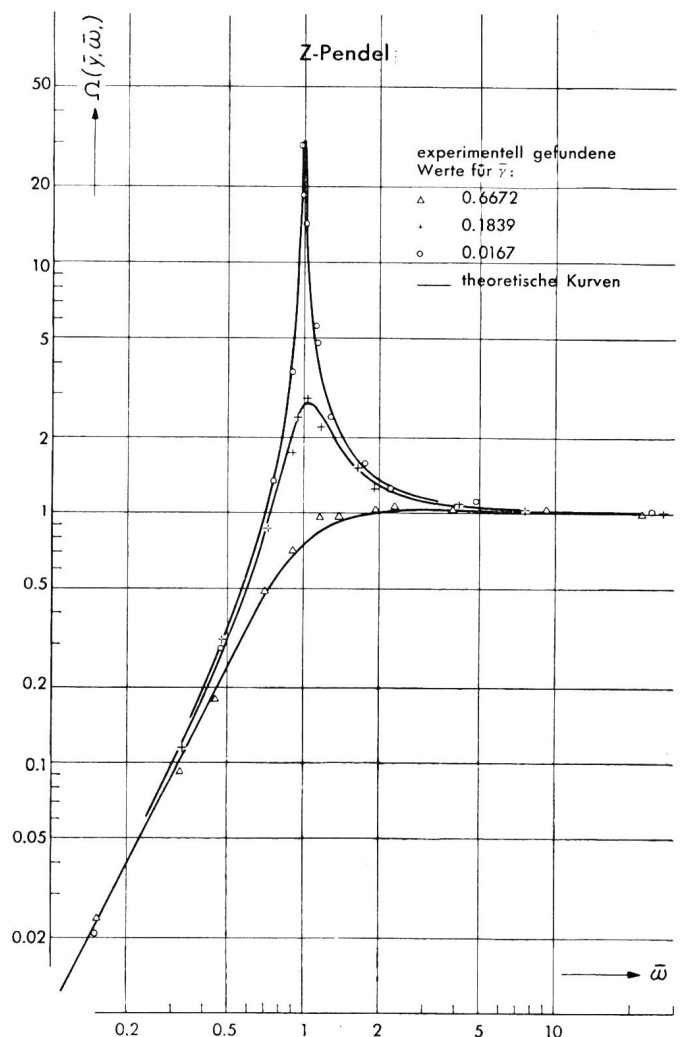


Fig. 10. Ergebnisse der dynamischen Prüfung des Vertikalpendels auf dem Schütteltisch im Vergleich zu den theoretischen Sollwerten

Durch Nullsetzen von $\frac{\partial u_A}{\partial \bar{\omega}}$ erhält man dasjenige

$\bar{\omega}$, bei dem u_A ein Maximum wird:

$$\bar{\omega}_{(u_A \max)}^2 = \frac{1}{1 - 2\gamma^2}. \quad (43)$$

Setzt man den Wert für $\bar{\omega}_{(u_A \max)}$ von (43) in (42) ein, so erhält man:

$$u_{A \max} = C' \cdot \frac{1}{2\gamma \sqrt{1 - \gamma^2}}. \quad (44)$$

$\frac{1}{2\gamma \sqrt{1 - \gamma^2}}$ kann als Resonanzüberhöhung bezeichnet werden. Für jedes Seismometer wurden einige theoretische Kurven berechnet und mit den experimentell erhaltenen Werten verglichen. Die Eigenperiode der Seismometer betrug bei diesen Versuchen 3 s und damit $\nu = \frac{2\pi}{3}$. Die Resultate zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment (vgl. Fig. 10).

B. DAS ÜBERTRAGUNGSSYSTEM

11. Allgemeines

Zum Übertragungssystem sollen jene Elemente gezählt werden, die zur Fernbedienung der Seismometer dienen und die Signale der elektromechanischen Umformer verstärken und demodulieren. Diese Funktionen werden teils von elektronischen Geräten erfüllt, teils werden sie von einem Verteiler- und Regelgerät für Gleichstrom gesteuert. Einen wichtigen Teil des Übertragungssystems bilden schliesslich die Kabelverbindungen zwischen den Seismometern und der Messzentrale.

12. Der elektronische Teil des Übertragungssystems

a) Allgemeines

Der prinzipielle Aufbau des elektronischen Teils ist aus Figur 11 (vgl. auch Fig. 12) ersichtlich. Ein Oszillator, der mit einer Frequenz von 1430 Hz schwingt, steuert drei Endstufen (jedes Seismometer wird von einer separaten Endstufe gespeist), die in den elektromechanischen Umformern (vgl. 3a) das magnetische Wechselfeld erregen. Die Stärke der Erregung kann mit einem eingebauten Weicheiseninstrument kon-

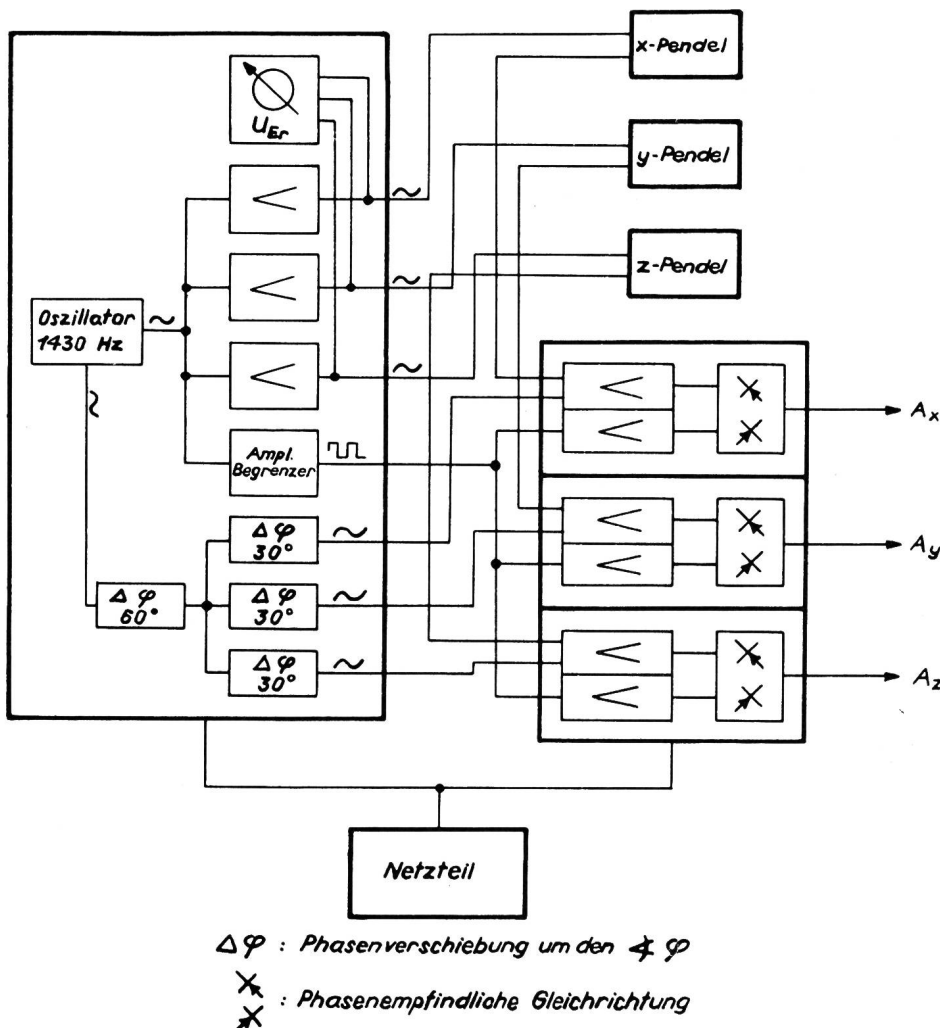


Fig. 11
 Blockscheina des elektronischen Teiles

trolliert werden (U_{Er}). Das Signal eines elektromechanischen Umformers wird zunächst verstärkt und dann einem phasenempfindlichen Gleichrichter zugeführt. Am Ausgang des Verstärkers tritt eine Spannung auf, die in der Grösse proportional zur Grösse der Verschiebung des beweglichen Teils des elektromechanischen Umformers ist. Der phasenempfindliche Gleichrichter wird durch eine Rechteckspannung (Mäander) gesteuert. Diese Wechselspannung wird durch einen zweistufigen Amplitudenbegrenzer aus der sinusförmigen Wechselspannung des Oszillators hergestellt und dann zur Entkopplung nochmals über eine für jeden Kanal separate Verstärkerstufe geführt. Versuche haben gezeigt, dass die Signalspannung, die der elektromechanische Umformer abgibt, nie ganz auf Null zurückgeht. Es bleibt vielmehr immer eine kleine Restspannung, die gegenüber den Signalspannungen, die auftreten, falls der bewegliche Teil des elektromechanischen Umformers ausgelenkt wird, um 90° in der Phase verschoben ist. Daher kann diese Restspannung durch blosses Verschieben des Schwingers nicht auskompensiert werden. Die Restspannung erzeugt zwar infolge ihrer Phasenlage nach dem phasenempfindlichen Gleichrichter kein Ausgangssignal, kann aber bei grosser Verstärkung die der Gleichrichterstufe vorangestellten Verstärkerstufen schon beachtlich aussteuern. Um dies zu vermeiden, wird dem Verstärker eine Spannung zugeführt, die gegenüber dieser Restspannung eine Phasenverschiebung von 180° aufweist und diese bei richtiger Dosierung gerade kompensiert. Ein erster Teil (etwa 60°) der nötigen Phasenverschiebung um $+90^\circ$ geschieht in einer gemeinsamen Stufe, während die restliche Drehung in einer für jeden Kanal separaten Trennstufe bewirkt wird. Die Ausgangsspannung A (Gegentakt) wird zur Steuerung der Registriereinrichtung benutzt.

b) Der Oszillator

Als Oszillatortröhre wurde eine Triode (6C5) mit Anoden-Gitter-Rückkopplung benutzt. Die Frequenz betrug 1430 Hz. Die Frequenzkonstanz war nach 10 Minuten Einbrennzeit besser als $\pm 0,5\%$.

c) Die Erregerstufen der elektromechanischen Umformer

Als Kraftstufe für die Erregung der elektromechanischen Umformer wurde pro Kanal je eine Leistungspentode (EL42) eingebaut. Der Erregerkreis wurde durch Parallelschaltung einer geeigneten Kapazität auf Resonanz abgestimmt. Die Speisung erfolgte mit Hilfe eines Transformators. Die Kreisgüte des Resonanzkreises war gering, so dass eine Änderung des Wertes der Kapazität um $\pm 10\%$ nur eine etwa 5%ige Änderung der Ausgangsspannung zur Folge hatte. Dadurch wurde das ganze System genügend unempfindlich gegen kleine Änderungen der Kapazität, etwa infolge der Benutzung verschiedener Kabellängen. Die Werte der Kapazitäten der ein-

zelnen Seismometer betragen: X-Pendel $0,5\mu F$, Y-Pendel $0,6\mu F$, Z-Pendel $0,2\mu F$.

Bei einer Erregerspannung von 20 V_{eff} beträgt der Klirr:

| Seismometer | 1. | 2. | 3. | 4. (Oberschwingung) |
|-------------|-----|-----|-----|---------------------|
| | % | % | % | % |
| X-Pendel | 1,3 | 1,3 | 0,4 | 0,1 |
| Y-Pendel | 0,4 | 0,5 | — | — |
| Z-Pendel | 0,7 | 0,4 | 0,1 | — |

d) Die Erzeugung der Wechselspannung (Mäander) zur Steuerung des phasenempfindlichen Gleichrichters

Das Signal des Oszillators wird in einer Doppeltriode vom Typ ECC40 durch Amplitudenbegrenzung in einen Mäander verwandelt. Um zu erreichen, dass die positive Spannung gleich lang gehalten wird wie die negative, musste das erste System stark positiv vorgespannt werden. Ein Potentiometer (10 k Ω) – nur intern verstellbar – gestattet eine kleine Variation dieser Vorspannung und damit eine allfällig notwendige Korrektur der positiven und negativen Impulsdauer. Das zweite System erlaubt zudem den Übergang zum Gegentakt. Eine für jeden Kanal separat vorhandene Triode ergibt schliesslich ein sehr gut entkoppeltes Signal von 80 V im Gegentakt.

e) Die Erzeugung der um 90° phasenverschobenen Kompensationsspannung

Über einen frequenzabhängigen Spannungsteiler, der bei 1430 Hz eine Phasendrehung von etwa $+60^\circ$ bewirkt, wird das allen Kanälen gemeinsame System einer 12AU7-Doppeltriode gesteuert. Die Stufe arbeitet als reiner Kathodenverstärker und steuert eine weitere, für jeden Kanal separat vorhandene Stufe, die ebenfalls als Kathodenverstärker arbeitet und eine weitere Drehung der Phase um etwa $+30^\circ$ bewirkt. Die abgegebene Spannung beträgt $0,5 V_{eff}$ und wird über einen Entkopplungswiderstand von 2 M Ω zusammen mit der Signalspannung des elektromechanischen Umformers dem Verstärker zugeführt. Am Gitter der ersten Röhre sind bei maximaler Verstärkung 4% oder 20 mV $_{eff}$ wirksam, da der Entkopplungswiderstand 2 M Ω , der Innenwiderstand der Signalquelle 50 k Ω beträgt.

f) Die Verstärkung der Signalspannung

Die Signalspannung des elektromechanischen Umformers beträgt bei einer Erregerspannung von 24 V_{eff} pro mm Verschiebung des beweglichen Teils gegenüber dem Rahmen, gemessen auf der Höhe der Anschläge, beim X- und Y-Pendel je etwa 3 V_{eff} , beim Z-Pendel etwa 1,5 V_{eff} . Die Signalspannung wird dem Gitter der ersten Verstärkerstufe (EF40) über einen Spannungsteiler mit 11 verschiedenen Teilungsverhältnissen zugeführt. Die Teilung geht von 1000 über 500, 200, 100, 50, 30, 15, 10, 5, 3 zu

der Position 2, bei der nur noch $20/_{00}$ der Signalspannung dem Verstärker zugeführt werden. Die zweite Verstärkerstufe – ebenfalls eine EF40 – ist über die erste Stufe etwa 8fach gegengekoppelt. Die Gegenkopplung ist bei jedem Kanal so eingestellt, dass alle Seismometer bei gleicher Erregung und Auslenkung ein gleich grosses Ausgangssignal abgeben. Die letzte Stufe – eine 6C5 – speist über einen Transformator den phasenempfindlichen Gleichrichter. Die Wechselspannung an der Anode dieser 6C5 ist herausgeführt, um den Verstärkerteil leicht überprüfen zu können. Der Verstärker ist linear bis zu einer Ausgangsspannung von $90 V_{\text{eff}}$. Die Spannungsverstärkung beträgt bei den Kanälen der Horizontalpendel im Maximum 300, beim Kanal Z, zum Ausgleich der geringeren Empfindlichkeit des elektromechanischen Umformers, das Doppelte.

g) Die phasenempfindliche Gleichrichtung

Die vom elektromechanischen Umformer abgegebene Spannung ist je nach der Richtung der Verschiebung des beweglichen Teils des Umformers gegenüber dem Rahmen in der Phase um 0° oder 180° gegenüber der Erregerspannung verschoben. Der Spulenstrom, der das Wechselfeld im Umformer erzeugt, ist gegenüber der Erregerspannung um -90° in der Phase verschoben. Die induzierte Signalspannung ist aber, da der Signalkreis einen praktisch rein Ohm'schen Widerstand darstellt, nochmals um $\pm 90^\circ$ je nach der Auslenkung gegenüber dem Spulenstrom verschoben, so dass die Phasenlage wieder ausgeglichen ist. Synchron mit der Erregerspannung und damit auch mit der Signalspannung wechselt die rechteckige Steuerspannung des phasenempfindlichen Gleichrichters das Vorzeichen. Zur Wirkungsweise des phasenempfindlichen Gleichrichters vgl. Walter [17].

Die benutzte Schaltung mit zwei Doppeldioden vom Typ 6H6 als Gleichrichterelemente arbeitet linear bis etwa $35 V =$ Ausgangsspannung. Die Spannungsverstärkung (Ausgangsspannung, gemessen in $V =$ am Gegentaktausgang; Eingangsspannung, gemessen in V_{eff}) beträgt für die Horizontalpendel 700, beim Verstärker zum Vertikalpendel wieder das Doppelte. Die Ausgangsimpedanz beträgt etwa $2 M\Omega$.

h) Der Netzteil

Die Speisespannung der Erregerstufen beträgt $210 V =$, bei einer Welligkeit von $0,7 V_{\text{eff}}$. Die Verstärker werden durch eine besser geglättete Anodenspannung von $270 V =$ und einer Welligkeit $< 0,01 V_{\text{eff}}$ gespeist. Die Stromaufnahme beträgt: $0,6 A/220 V_{\text{eff}}$.

i) Die Grösse der Kopplung

Da einige der elektronischen Elemente allen Kanälen gemeinsam sind, musste auf eine möglichst gute Entkopplung geachtet werden. Die Kopplung zwischen zwei Kanälen beträgt im Maximum $0,5\%$ und höchstens $0,5 V =$ am Ausgang des beeinflussten Kanals, was sich als ausreichend erwiesen hat.

k) Der mechanische Aufbau

Der ganze elektronische Teil ist in einem grösseren Apparatekoffer ($90 \times 40 \times 25 \text{ cm}^3$) aus massivem Anticorodalblech untergebracht. Der Generatorteil, die drei Verstärkerkanäle und der Netzteil bilden je eine auswechselbare Einheit. Während des Transportes können die Frontplatten gedeckt werden, so dass keinerlei Beschädigungen der Bedienungsarmaturen befürchtet werden müssen. Gewicht: 37 kg^* .

13. Das Verteiler- und Regelgerät für die Gleichstromanlage

Wie bereits erwähnt, ist jedes Seismometer mit einer elektromagnetisch erregten Wirbelstrombremse ausgerüstet. Die Wirksamkeit dieser Dämpfungsglieder kann durch Variation des Erregerstromes in den Elektromagneten von der Zentrale aus reguliert werden. Ebenso kann durch Variation des Erregerstromes die elektromagnetische Nullpunktkorrektur gesteuert werden. Die Verteilung und Regulierung dieser Gleichströme geschieht von einem besonderen Gerät aus, das die zur Steuerung und Kontrolle notwendigen Elemente (Leistungspotentiometer, Ampèremeter) enthält. Die Ströme werden entweder einem einzigen 6V-Akkumulator entnommen, oder es kann auch für jedes Seismometer eine separate Stromquelle angeschlossen werden. Die Abmessungen des Gerätes sind: $38 \times 17 \times 17 \text{ cm}^3$, sein Gewicht: 4 kg^* .

14. Die Kabel

Die Speisung und Fernbedienung der Seismometer erfolgt über ein 6aderiges Kabel. Die Signalspannung wird über ein spezielles, einaderig-abgeschirmtes Kabel der Messapparatur zugeführt. Es stehen pro Seismometer Kabel von 10 m Länge sowie eine Verlängerung von 100 m zur Verfügung. Die Kabel können im Bedarfsfalle aneinandergehängt werden, so dass ein Abstand von 300 m zwischen dem Aufstellungsort der Seismometer und der Messzentrale überbrückt werden kann. In diesem Falle kann allerdings immer nur ein Seismometer angeschlossen werden. Gewicht von 100 m Kabel inkl. Kabelrolle: 6aderig 20 kg^* , 1aderig 14 kg^* .

C. DIE REGISTRIERUNG

15. Allgemeines

Die beschriebene Apparatur eignet sich sowohl zur Untersuchung von lange dauernden Vorgängen, als auch von kurzzeitigen Erschütterungen. Es mussten daher auch verschiedene Registriergeräte bereitgestellt werden, die je nach der Art der zu untersuchenden Erschütterungen eingesetzt werden können.

16. Die Registrierung

mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen

Ohne eine weitere Verstärkung kann mit der Ausgangsspannung des Übertragers ein Kathodenstrahl-

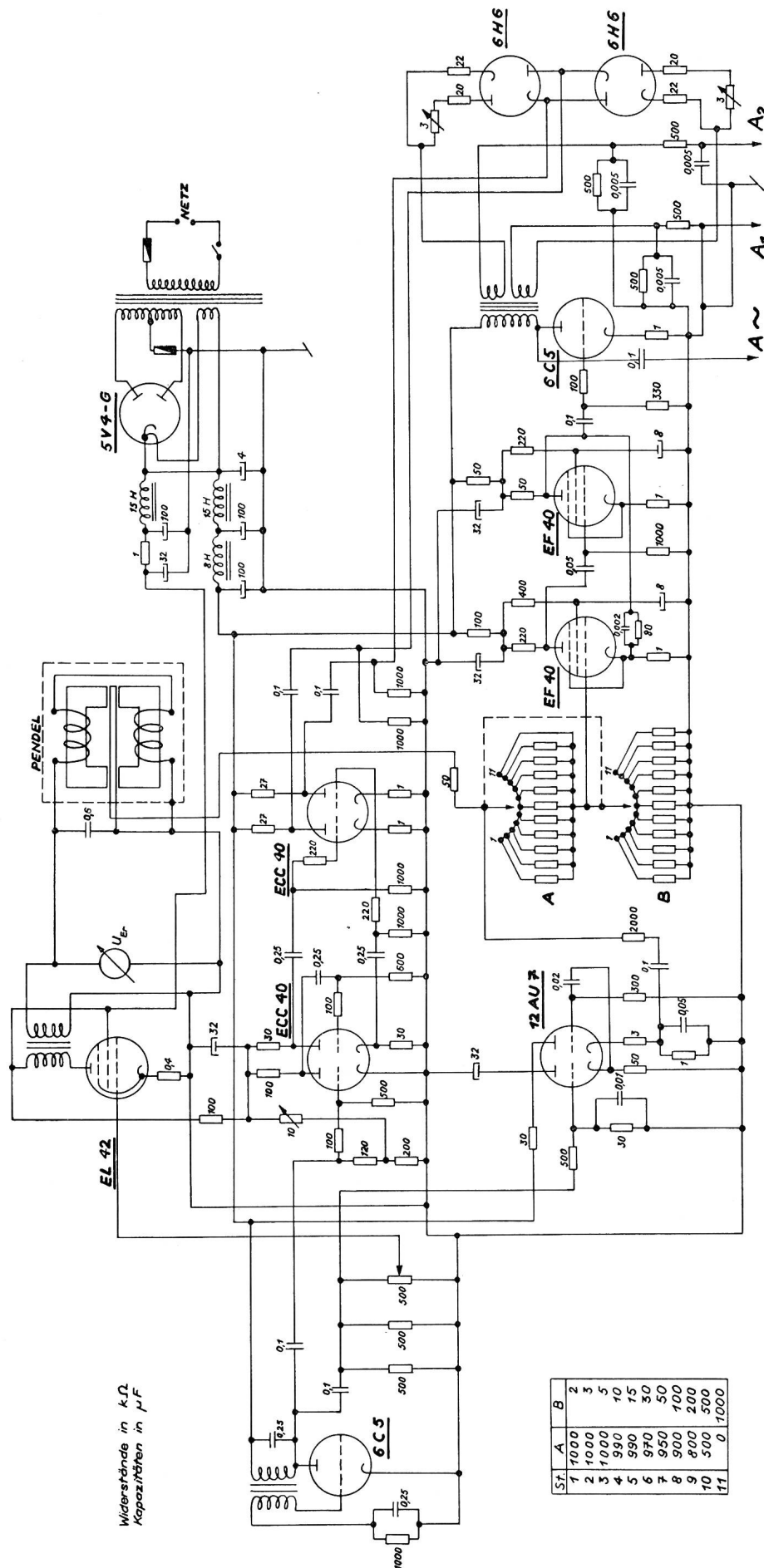


Fig. 12. Schaltschema des elektronischen Teiles (1 Kanal)

Oszillograph gesteuert werden. Eine geeignete Registriereinrichtung mit einem Kathodenstrahl-Oszillograph als Hauptgerät, wurde von *M. Weber* [19] gebaut. In unserem Fall interessiert vor allem, dass bei der erwähnten Registrierapparatur die Zeitbasis bis 10 s beträgt, was bei einem nutzbaren Schirmdurchmesser von 5 cm einer Geschwindigkeit von 0,5 cm/s entspricht. Ein Elektronenschalter gestattet zudem die Beobachtung von zwei verschiedenen Vorgängen. Registriert wird mit Hilfe eines Photozusatzes. Dieses Registriergerät eignet sich vor allem für die Aufnahme periodischer Erschütterungen, wie sie durch automatische Hämmer, Rammen, Vibratoren oder ähnliche technische Erschütterungsquellen erzeugt werden.

17. Die Registrierung mit Kristallzeigern

Die gebaute Anordnung ist ganz ähnlich der von *Weber* [19] benutzten. Die aktiven Elemente bilden je zwei aufeinandergekittete Kristallplättchen (etwa $30 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$), die so aus einem piezoelektrischen Material (Seignettesalz) geschnitten wurden, dass sie, falls zwischen der Mittelelektrode und den Aussenflächen eine Spannung angelegt wird, etwas tordiert werden. Spannt man ein solches Kristallplättchen auf der einen Schmalseite ein und klebt ein kleines Spiegelchen in der Nähe der gegenüberliegenden Seite auf das Plättchen, so wird die Spiegelebene etwas verdreht, sobald an den Kristallzeiger eine Spannung angelegt wird. Dreht sich die Spiegelebene um den kleinen Winkel α , so wird ein Lichtpunkt, der das Bild einer punktförmigen Lichtquelle auf einem Schirm im Abstand d vom Spiegelchen ist, um die Strecke $2\alpha d$ ausgelenkt. Man erhält bei Verwendung einer linearen Lichtquelle, eines Hohlspiegelchens und einer Zylinderlinse eine zur photographischen Registrierung genügende Lichtintensität.

Das gebaute Registriergerät enthält vier Kristallzeiger, von denen einer für die Zeitmarkierung vorgesehen ist. Da die Empfindlichkeit der Kristallzeiger (Torsionswinkel pro Spannungseinheit) bei starker Durchfeuchtung der Kristallplättchen sehr gering ist und diese bei Feldbetrieb, besonders bei nebliger Witterung, rasch auftreten kann, wurde ein Trocknungsturm eingebaut, der periodisch mit einem milden Trocknungsmittel beschickt wird. Besonders geeignet ist dazu Blaugel, das im frischen Zustand blau, bei Erschöpfung indessen rötlich gefärbt ist. Blaugel kann nach Erhitzen regeneriert werden.

Im Unterteil des Kristallzeigerblocks sind drei Verstärkerstufen (je eine Doppeltriode 12 AX7) untergebracht. Die Kristallzeiger sind in Brückenschaltung zwischen die Anoden der beiden im Gegenakt arbeitenden Systeme geschaltet. Beträgt die Eingangsspannung $1 V_{\text{eff}}$, so ist die Doppelamplitude der Registrierung bei 2 m Abstand von den Kristallzeigern etwa 3 mm. Der Frequenzgang ist bis 150 Hz linear. Die maximale Doppelamplitude, die verzerrungsfrei geschrieben werden kann, beträgt 2 cm.

Mit Hilfe eines Spannungsteilers kann die Empfindlichkeit auf $1/3$ oder $1/10$ herabgesetzt werden. Der Verstärker besitzt auch einen Kathodenausgang, so dass er auch modernen Registriergeräten mit bi- oder multifilaren Schleifen angepasst werden kann. Der Stromverbrauch des Gerätes ist so gering (Heizung 6,3 V/1,8 A, Anodenstrom 300 V/ 8 mA), dass er vom Netzteil des Übertragers gespeist werden kann. Die Dimensionen sind: $39 \times 14 \times 16 \text{ cm}^3$, das Gewicht: 3,7 kg.*

Zusammen mit einem fortlaufenden Filmtransport (Filmvorrat 15 m) oder einer rotierenden Trommel, auf der ein Filmband von 1 m Länge aufgespannt werden kann, ist das Kristallzeigersystem besonders zur Registrierung von Vorgängen bis zu einigen Sekunden Dauer (angewandte Seismik, Verkehrserschütterungen) geeignet. Die Filmgeschwindigkeit kann bei Benutzung der Registriertrommel bis auf 3 m/s gesteigert werden. Die maximale Filmgeschwindigkeit bei fortlaufendem Transport beträgt etwa 50 cm/s.

18. Die Registrierung mit einem Tintenschreiber

Ein Nachteil der photographischen Registrierung ist der, dass die Filme vor der Auswertung der Seismogramme entwickelt werden müssen. Es sind zwar verschiedene Entwicklungsgeräte gebaut worden, die eine eigentliche Dunkelkammer überflüssig machen, doch ist die Handhabung der allenfalls noch nassen Seismogramme, der lange dauernde Wasch- und Trocknungsprozess und schliesslich die auftretenden Verzerrungen des Papiers vor allem im Feld hinderlich. Die Entwicklung eines Seismogramms von mehreren Metern Länge, wie es bei einer längeren Registrierung mit fortlaufendem Filmtransport anfällt, bietet zudem ganz erhebliche technische Schwierigkeiten. Schliesslich sind auch die Kosten bei einem Papierpreis von etwa 1 sFr/m bei längeren Registrierdauern bedeutend. Die erwähnten Nachteile fallen bei einem Direktschreiber, der mit Tinte auf gewöhnliches Papier schreibt, alle weg. Dafür benötigt ein solches Registriergerät eine viel grössere Steuerleistung, die zum Beispiel gegenüber modernen Schleifengeräten mehr als das 1000fache beträgt.

Der benutzte Tintenschreiber ist ein Typ aus dem Fabrikationsprogramm der Firma J. A. Dreyfus-Graf, in Genf [5]. Das zweiseiprige Gerät ist mit Schreibern (SEDb2) einer Empfindlichkeit von 0,8 mm/mA ausgerüstet. Der Ohmsche Widerstand beträgt je 6 k Ω . Der maximal zulässige Strom ist 17 mA, was einer Leistungsaufnahme von 1,7 Watt entspricht. Der Papiervorschub beträgt pro Sekunde 10, 5 oder 0,5 cm. Eine zusätzliche Untersetzung erlaubt eine Verkleinerung des Vorschubs im Verhältnis 10:1. Die Geschwindigkeiten können durch einfaches Umschalten des von einem Elektromotor angetriebenen Untersetzungsgetriebes gewählt werden. Die Auswertung der Seismogramme wird durch den Umstand stark erleichtert, dass das Gerät gerade

schreibt und nicht in krummlinigen Koordinaten. Der Papiervorrat beträgt maximal 300 m.

Zum Betrieb des Schreibers wurde eine Gegentaktstufe mit zwei UL41 gebaut. Der kleine Arbeitswiderstand (1,5 k Ω pro System bei 220 V = Anodenspannung) dieses Typs wirkt sich beim Betrieb der Schreiber, die in Brückenschaltung zwischen die beiden Arbeitswiderstände gelegt wurden, günstig aus. Die Empfindlichkeit des Registriersystems beträgt 3,5 mm Doppelamplitude bei einer Eingangsspannung von 1 V_{eff}. Der lineare Frequenzbereich geht von 0...20 Hz. Natürlich kann der Verstärker auch zur Steuerung anderer Registriergeräte benutzt werden. Der Verstärker allein hat einen linearen Frequenzgang von 0...2000 Hz, eine 13fache Spannungsverstärkung und ist linear bis 65 V_{eff}.

Stromverbrauch: Verstärker 0,6 A/220 V_{eff}
Tintenschreiber 0,3 A/220 V_{eff}

Dimensionen: Verstärker 31 \times 20 \times 20 cm³
Tintenschreiber 28 \times 28 \times 28 cm³

Gewicht: Verstärker 10,5 kg*
Tintenschreiber 16 kg*

D. PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN

19. Die Art des Einsatzes

Die beschriebene Erschütterungsmessapparatur wurde bereits verschiedentlich praktisch eingesetzt, und zwar zur Untersuchung von Erschütterungen in Gebäuden und im Feld, zur Abklärung der Erschütterungsverhältnisse in der Umgebung von Fundamenten verschiedener Bauart, die durch eine Schwingmaschine (Losenhausen 2000/4-20) dynamisch beansprucht wurden. Bei diesen Versuchen war die Apparatur von Mitte November bis Mitte Dezember 1953 ständig im Einsatz und konnte so gründlich erprobt werden. Sowohl der mechanische als auch der elektrische Teil der Anlage befriedigte, nachdem einige Schwächen behoben waren.

20. Das Justieren der Seismometer auf wenig tragfähigem Untergrund

Ist der Untergrund, auf dem die Erschütterungsmessungen durchgeführt werden sollen, nicht gewachsener Fels, sondern ein Boden aus Lockermaterial, so ist es oft schwierig, die Seismometer messbereit zu machen. Jedenfalls können bei Acker- oder Wiesland die Seismometer nicht einfach auf den Boden gestellt werden, wie es zum Beispiel in der angewandten Seismik üblich ist. Da in unserem Fall die Nullkomponente mitregistriert wird, müssen die Seismometer genau horizontal aufgestellt werden, was eine stabile Unterlage verlangt. Andererseits ist natürlich darauf zu achten, dass nicht durch zeitraubende Arbeiten bei der Vorbereitung der Messstellen ein grosser Teil des Vorteils, der in der guten Transportierbarkeit der Anlage liegt, verloren geht. Gut bewährt hat sich im Feld folgendes Vorgehen: Zunächst wird für jedes Seismometer ein kleiner

Pfahlrost erstellt, indem je drei Holzpflocke etwa 50 cm in den Boden gerammt werden. Auf die im Dreieck angeordneten Pfähle, die etwa 10 cm aus dem Boden ragen, wird eine massive Platte gelegt, auf die das Seismometer zu stehen kommt. Findet sich in der Nähe der vorgesehenen Meßstelle eine grössere stabile Unterlage, zum Beispiel eine Steinplatte, ein Markstein, der Deckel einer Quellschachtung oder eines Drainageschachts, so wird man bei gewissen grossräumigen Untersuchungen die Stationen mit Vorteil dorthin verlegen. Die massiven Platten, die beim Pfählen als Unterlage benutzt werden, sind aber in diesen Fällen als Unterlage nicht geeignet, da solche Objekte praktisch nie ganz eben sind und die Platten deshalb wackeln. Besser geeignet sind dann kleine Plättchen von etwa 4 cm Durchmesser, die unter die Stellschrauben des Seismometers gelegt werden. Um jedes unerwünschte Rutschen auszuschliessen, wird man die Plättchen unter Umständen aufgipsen. Ein weiterer Umstand, dem beim Einstellen der Pendel Rechnung getragen werden muss, besteht darin, dass sehr häufig die Oberfläche des Untergrundes durch das Gewicht der Person, die die Seismometer einstellt, verbogen wird. Sobald sich dann diese Person entfernt, stellt sich bei den Seismometern eine neue Nullage ein. Bei starker Vergrösserung erwies es sich zudem als unmöglich, die Verbindung zwischen Kontrollinstrument und Seismometer zu lösen, ohne dass die Nullage bereits wieder in unzulässiger Art gestört worden wäre. Diesem Umstand kann man so begegnen, dass man zwei längere Kabelstücke beständig in den Buchsen, zu denen die Ausgangsspannung des Übertragers zurückgeführt wird, stecken lässt und so das Instrument zur Kontrolle anschliessen und entfernen kann, ohne das Seismometer direkt berühren zu müssen.

Am schnellsten und zuverlässigsten liess sich das Einrichten bewerkstelligen, wenn zwischen einem Beobachter in der Messzentrale und dem Messgehilfen bei den Seismometern eine telefonische Verbindung bestand. In diesem Falle konnte der Beobachter die notwendigen Korrekturen einberechnen, wie zum Beispiel die Durchbiegung des Bodens unter dem Gewicht des Einstellenden dies verlangte. Nach einiger Zeit konnte bei dieser Art des Vorgehens eine Station in 20 Minuten abgebrochen und auf einem neuen Standort messbereit gemacht werden. Das Einstellen wird um so kritischer, je grösser die Periode der Seismometer ist. Die gemachte Zeitangabe bezieht sich auf eine Periode von etwa 3 s, die fast bei allen Messungen benutzt wurde.

21. Die Schwierigkeiten bei starken Vergrösserungen

Normalerweise genügt eine Vergrösserung bis etwa 5000. Bei Untersuchungen der natürlichen Bodenunruhe oder ähnlicher Erschütterungen mit sehr kleinen Amplituden wäre es aber manchmal vorteilhaft, wenn die Vergrösserung noch gesteigert werden könnte. Dabei treten aber infolge der Un-

Stabilität der Nullage grosse Schwierigkeiten auf. Man kann sich dann so helfen, dass man die Nullkomponente nicht mehr mitregistriert, indem man nach der phasenempfindlichen Gleichrichtung nochmals eine Verstärkerstufe anfügt, die nur noch Frequenzen bis etwa 0,1 Hz verstärkt. Auf diese Weise wurden bei Feldbetrieb Verstärkungen bis zum 100 000-fachen realisiert.

E. DIE APPARATUR ZUR DYNAMISCHEN EICHUNG

22. Allgemeines

Bei der dynamischen Eichung wird das Seismometer in definierter Art bewegt und sein Verhalten geprüft. Bei grossen Seismometern, die manchmal mit Schwingern von mehreren Tonnen Masse ausgerüstet sind, ist eine dynamische Prüfung praktisch undurchführbar. Man eicht solche Instrumente daher mit statischen Methoden, zum Beispiel durch geringes Neigen des Rahmens oder durch Auflegen von Zusatzmassen auf den Schwinger. Zusammen mit der Dämpfung und der Eigenperiode, deren Grösse aus Abklingversuchen des frei schwingenden Schwingers gefunden werden kann, können die interessierenden Grössen (dynamische Vergrösserung, Resonanzüberhöhung usw.) berechnet werden. Gegenüber diesen statischen Versuchen sind Experimente mit einem Schütteltisch, auf dem das Seismometer bei verschiedenen Frequenzen und Amplituden geschüttelt wird, vorzuziehen, weil mit den praktischen Verhältnissen vergleichbare Versuchsbedingungen auftreten. Ferner können beispielsweise die störenden Frequenzen (10b) oder die Lage der Arbeitsrichtung (10a) nur mit Hilfe von dynamischen Versuchen einfach bestimmt werden.

Eine Schütteleinrichtung besteht aus dem Schütteltisch und den notwendigen Apparaturen zu seinem Antrieb und zur Kontrolle der Tischbewegung. In unserem Falle wird der Schütteltisch elektrodynamisch angetrieben. Ein Tieftongenerator steuert eine Kraftstufe, die den Tisch antreibt. Die Bewegungen der Schüttelplatte werden mit Hilfe eines optischen Systems kontrolliert.

23. Der Schütteltisch

a) Der Aufbau des Vertikal-Schütteltisches

Der Schütteltisch funktioniert nach dem elektrodynamischen Prinzip [12]. Der Elektromagnet (vgl. Fig. 13), der im Spaltraum ein Magnetfeld von 4000 Gauss erzeugt (Erregung 110 V/4 A) hat ein Gewicht von 400 kg.* Der mittlere Umfang der Tauchspule beträgt 38 cm und die Wicklung besteht aus 2×5100 Windungen von 0,2 mm starkem, emailiertem Kupferdraht. Anfang und Ende beider Wicklungen sind separat herausgeführt, so dass die Spule im Ein- und Gegentakt betrieben werden kann. Die bewegliche Masse des unbelasteten Tisches beträgt

14,7 kg. Die Einspannung besitzt eine Federkonstante von 210 kg*/cm und besteht aus sechs Stahlfederlamellen, die je zu dritt in einem Abstand von 10 cm übereinander angeordnet sind, was eine gute Geradföhrung ergibt. Die Eigenfrequenz des unbelasteten Tisches beträgt 18,8 Hz. Die Dämpfung ist nur gering. Aus Abklingversuchen wurde ein Dämpfungsverhältnis (vgl. 3b) von 1,03 ohne Magnetfeld und von 1,25 bei eingeschaltetem Magnet (Wirbelströme im Spulenkörper) bestimmt. Die maximale Auslenkung, die noch innerhalb des linearen Bereiches der Strom-Auslenkungsrelation liegt, beträgt $\pm 0,5$ mm, wobei im statischen Fall einer Auslenkung von 0,7 mm ein Strom von 0,1 A entspricht. Der Durchmesser der runden Tischplatte, auf welche der Prüfling gestellt wird, beträgt 38 cm.

Die Bewegungen des Tisches, insbesondere die Schwingweite, werden nach dem Drehspiegelverfahren [1] kontrolliert. Benutzt man eine Einfadenlampe als Lichtquelle und ein Hohlspiegelchen mit etwa 2 m Brennweite, so erhält man auf dem Beobachtungsschirm einen etwa 0,2 mm breiten Lichtstrich.

Der Radius der benutzten Übertragungsrolle betrug 1,65 cm, so dass, bei einem Abstand von 2 m zwischen Spiegel und Beobachtungsschirm, eine 250fache Vergrösserung erhalten wurde.

An Stelle der visuellen Beobachtung kann auch eine photographische Registrierung vorgenommen werden, indem der Lichtstrich durch eine Zylinderlinse auf einen Punkt zusammengezogen und auf ein laufendes Band von photographisch empfindlichem Papier projiziert wird. Das optische Kontrollsystem funktioniert bis etwa 60 Hz einwandfrei [18].

b) Der Zusatz zur Erzeugung horizontaler Schwingungen

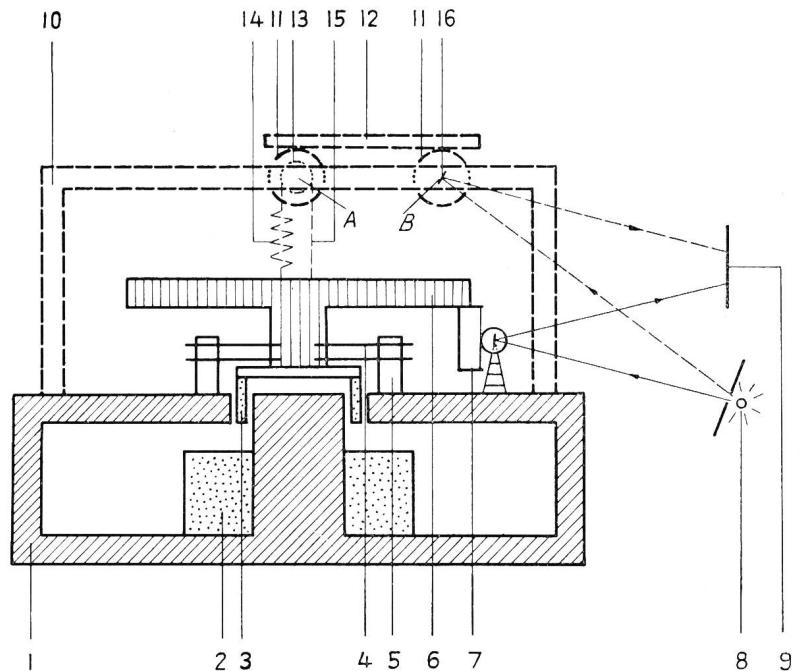
Prinzipiell könnte eine Schütteleinrichtung mit horizontaler Arbeitsrichtung durch Kippen des Vertikal-Schütteltisches um 90° erhalten werden. Bei einer Masse von über 400 kg hätten indessen mechanische Hilfsmittel beigezogen werden müssen, die nicht zur Verfügung standen. Es wurde daher ein leicht demontierbarer Aufbau konzipiert. Er besteht zunächst aus einem soliden, viereckigen Rahmen (vgl. Fig. 13), dessen vier Stützen auf den Magnetkörper geschraubt werden (der Aufbau entspricht der Form nach einem Tisch ohne Tischplatte). Am Rahmen sind vier Kugellager für die beiden Tragachsen montiert, von denen A genau über der Mitte der runden Schüttelplatte des Vertikal-Schütteltisches liegt, die zweite, B, von dieser 25 cm entfernt ist. Die vier Pendelkugellager können in der Höhe etwas verstellt werden und sind so konstruiert, dass die Achsen etwas schief stehen können, ohne dass das Lager klemmt oder die Föhrung mangelhaft wird. Dadurch können die Achsen genau horizontal gerichtet werden, auch wenn das Gestell etwas schief steht.

Fig. 13

Schematischer Querschnitt durch den Schütteltisch

1. Magnetkörper
2. Erregerspule
3. Tauchspule
4. Federlamellen
5. Ringkörper
6. Tisch
7. Drehspiegelsystem
8. Lichtquelle
9. Beobachtungsschirm
10. Gestell des «Horizontal»-Zusatzes
11. Tragscheiben
12. Schüttelplatte
13. Antriebsrolle
14. Gespannte Feder
15. Stahlsaite
16. Kontrollspiegel

Alles, was gestrichelt gezeichnet ist, gehört zum Zusatz zur Umlenkung der vertikalen Bewegungen in horizontale



Auf der Achse A sind, symmetrisch zur Mitte, in einem Abstand von je 6,5 cm, zwei genau rund laufende Scheiben aufgef lanscht. Diese tragen zusammen mit einer dritten genau gleich grossen Scheibe, die in der Mitte der Achse B befestigt ist, die rechteckige Schüttelplatte aus Glas oder Metall. In der Mitte der Achse A ist noch ein etwas kleineres Rädchen angebracht. Eine Stahlsaite führt vom Vertikal-Schütteltisch über eine feine Rille dieser Antriebsrolle wieder zur Tischplatte des Vertikal-Schütteltisches zurück, aber nicht direkt, sondern über ein elastisches Zwischenstück. Bewegt sich die Schüttelplatte des Vertikal-Schütteltisches auf und ab, so wird die Vergrösserung bzw. Verringerung des Abstandes zwischen der Schüttelplatte und dem Antriebsrädchen durch das elastische Zwischenstück ausgeglichen. Dabei wird die Antriebsrolle hin und her bewegt und diese Bewegung im Verhältnis R/R' – wobei R der Radius der Tragrollen, R' derjenige des Antriebsrädchens bedeutet – vergrössert von den Tragrollen auf die horizontale Schüttelplatte übertragen. Um ein Rutschen der Antriebsrolle unter der Stahlsaite möglichst zu vermeiden, wurde die Saite ganz um die Rolle geführt. Es wurde auch versucht, die Friktion zwischen der Schüttelplatte und den Tragrollen zu erhöhen, indem auf letztere Gummireifen aufgezogen wurden. Es zeigte sich aber, dass diese zu wenig genau rund liefen.

Der beschriebene Schütteltischzusatz arbeitet bis etwa 15 Hz zuverlässig. Bei höheren Frequenzen beginnen die Tragrollen auf der Antrieb achse A unter der Schüttelplatte zu rutschen. Die Bewegungen der Schüttelplatte werden mit Hilfe eines Spiegelchens auf der Drehachse B kontrolliert. Da letztere von der Schüttelplatte passiv bewegt wird, werden Feh-

ler, die im Rutschen des Friktionsantriebes begründet sind, vermieden.

24. Der Kraftverstärker zum Schütteltisch

Zum Antrieb des Schütteltisches wurde ein Kraftverstärker mit einer Leistungs-Doppeltriode 6AS7 als Endstufe im Gegentaktbetrieb gebaut. Der Anodenstrom (Ruhestrom 100 mA pro System) fliesst dabei durch die beiden Wicklungen der Tauchspule (vgl. 23a). Der Stromfluss ist in den beiden Hälften entgegengesetzt, so dass der Ruhestrom, der für beide Systeme genau gleich gross ist, keine Auslenkung des Tisches bewirkt. Der linear aussteuerbare Anodenstrom beträgt ± 70 mA, wozu an der Vorstufe (zwei EL42 im Gegentakt) eine Steuerspannung von 5 V benötigt wird. Die untere Grenzfrequenz beträgt 0,03 Hz.

25. Der Tieftongenerator

a) Der prinzipielle Aufbau

Das Prinzipschema ist in Figur 14 dargestellt. Zunächst werden mit Hilfe von zwei RC-Generatoren die Wechselspannungen der Frequenz f_1 und f_2 erzeugt. Dabei ist die Frequenz des einen Generators (f_1) fest eingestellt, während diejenige des andern kontinuierlich in einem kleinen Bereich, der auch f_1 enthält, geändert werden kann. Über eine Trennstufe werden die beiden Generatorspannungen zu einer Schwebung zusammengefügt und durch ein Filter [19, 20] von den Oberschwingungen befreit. Mit Hilfe eines Spannungsteilers, der zur Regelung der Ausgangsspannung dient, wird ein Teil der Schwebungsspannung in der nächsten Stufe nochmals verstärkt. Die folgende Stufe (vgl. Fig. 15) hat in guter Näherung eine Charakteristik von der Form:

$$U_k = 0,05 (U_g + 1)^2 + 2,18 \quad (\text{Volt})$$

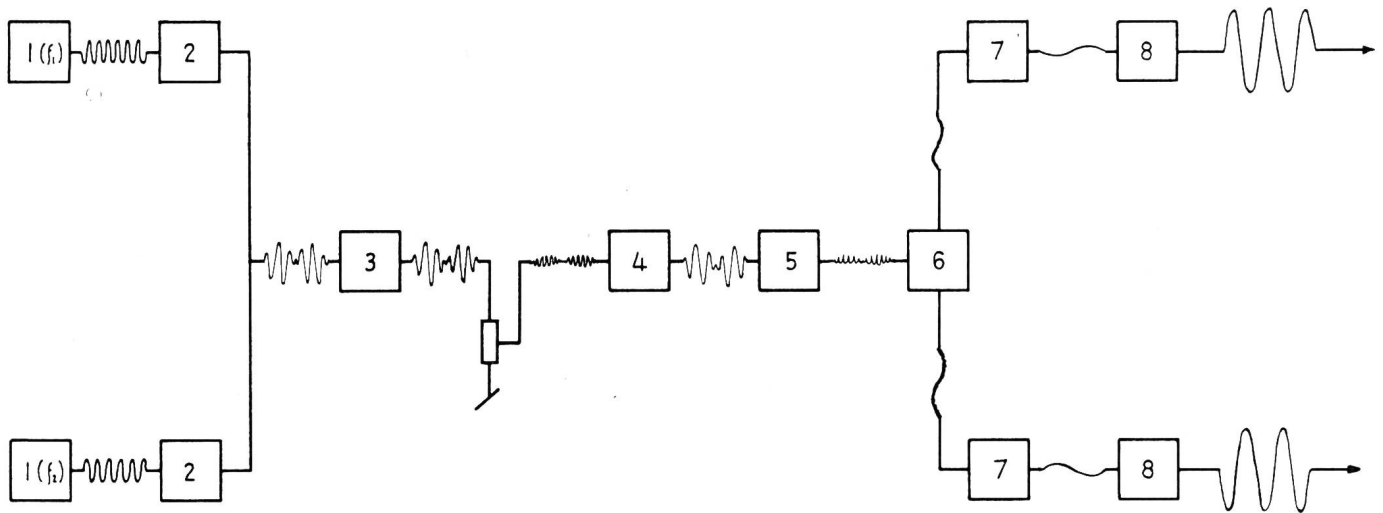


Fig. 14. Blockschema des Tieftongenerators

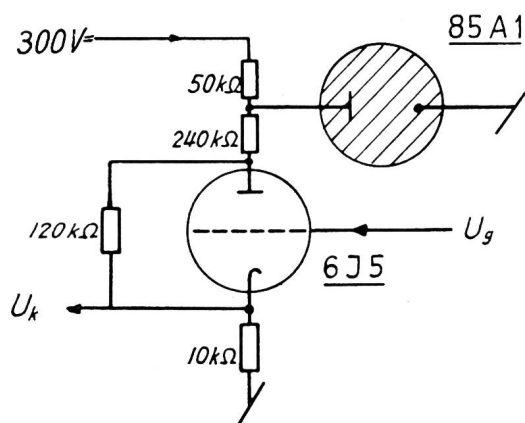
- | | | | |
|-----------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 = Generatoren | 3 = Eingangsfiler | 5 = nicht-lineares Glied | 7 = Ausgangsfiler |
| 2 = Trennstufe | 4 = Zwischenverstärker | 6 = Phasenkehrstufe | 8 = Ausgangsverstärker |

Dabei bedeutet U_k die Spannung am Kathoden-
ausgang, U_g die Steuerspannung am Gitter. Die Be-
ziehung gilt für $1 > U_g > -1$.

Nimmt man an, dass f_1 und f_2 das Gitter mit je
0,5 V \sim steuern, so erhält man am Kathodenaus-
gang folgende Wechselspannungen:

| Frequenz | Amplitude (Volt) |
|---------------|------------------|
| f_1 | 0,05 |
| f_2 | 0,05 |
| $2 f_1$ | 0,006 |
| $2 f_2$ | 0,006 |
| $f_1 + f_2$ | 0,0125 |
| $ f_1 - f_2 $ | 0,0125 |

Beachtenswert ist dabei das relativ günstige Ampli-
tudenverhältnis der gewünschten Differenzfrequenz
 $|f_1 - f_2|$. Ferner geht aus der Berechnung hervor,
dass die Amplitude der Differenzfrequenz dem Pro-
dukte der Amplituden der beiden Grundfrequenzen
proportional ist.

Fig. 15. Schema des nicht-linearen Verstärkergliedes zur Erzeu-
gung der Differenzfrequenz

Die folgende Phasenkehrstufe vermittelt den Über-
gang zum Gegentakt und filtert die höheren Fre-
quenzen bereits etwas aus, während die Differenz-
frequenz etwa 20fach verstärkt wird. Das folgende
zweistufige Tiefpassfilter unterdrückt die Grund-
frequenzen und die höheren Frequenzen noch voll-
ständig, so dass am Filterausgang der Abstand 80 dB
beträgt. Im Tiefpass wird die Differenzfrequenz noch-
mals zweifach verstärkt, so dass mit der 16fachen
Spannungsverstärkung der Endstufe für die Diffe-
renzfrequenz bis zum Ausgang eine 640fache Span-
nungsverstärkung resultiert.

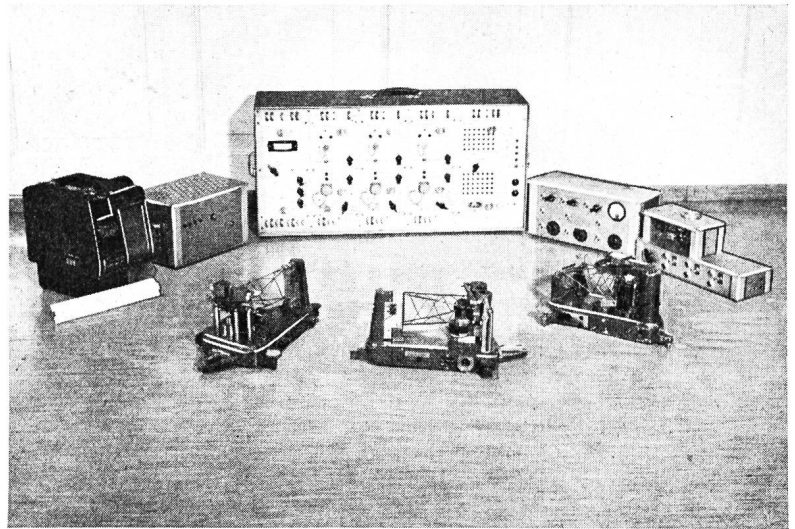
b) Die Eigenschaften

Der Frequenzbereich umfasst in drei Stufen (ent-
sprechend drei Frequenzwerten für f_1 : 4,0, 18 und
208 Hz) das Band von 0,01...20 Hz. Die unteren Grenzfrequenzen der einzelnen Stufen sind durch Mit-
nahmeeffekte gegeben. Diese treten trotz sorgfältiger
Entkopplung in Erscheinung, sobald der Frequenz-
unterschied zwischen f_1 und f_2 kleiner als 1 % wird.
Zwischen 0,03 und 10 Hz beträgt die Amplituden-
konstanz ± 3 db.

Die Amplitudenkonstanz bei einer Temperaturschwankung von $\pm 5^\circ\text{C}$ beträgt $\pm 1\%$. Nach einer Einbrenndauer von 100 Minuten betragen die Frequenzschwankungen unter den gleichen Bedingungen $\pm 5\%$ (gemessen bei einer Periode von 40 s). Bei Versuchsdauern von einigen Minuten treten diese Variationen kaum in Erscheinung, da diese sehr langsam erfolgen. Hingegen kann der Frequenzgang während der Einbrennzeit, der zum Beispiel bei den erwähnten Versuchen die Periodendauer von 20 auf 40 s erhöhte, dazu benutzt werden, um ein Seismometer auf dem Schütteltisch genau mit der Resonanzfrequenz zu schütteln. Man kann dazu einfach einen etwas höheren Frequenzwert als den der Resonanzfrequenz einstellen, den Schütteltisch antrei-

Fig. 16

Instrumentarium für den Feldbetrieb. Von links nach rechts: im Vordergrund die beiden Horizontalpendel und das Vertikalpendel; im Hintergrund der Tintenschreiber und der dazugehörige Kraftverstärker; ferner der grosse Apparatekoffer, das Kontroll- und Regelgerät für die Gleichstromanlage sowie das Kristallzeigergerät



ben und während der Einbrenndauer des Generators ständig registrieren. Die Resonanzfrequenz wird dann ganz langsam durchfahren, während sonst eine Einstellung, besonders bei kleiner Dämpfung, schwierig ist.

Mit Hilfe eines Analysators «Mader-Ott» [13] konnte der registrierte Spannungsverlauf auf Klirrateile untersucht werden. Während der Klirr bei einer Frequenz von 0,01 Hz 30 % und bei 0,03 Hz noch 9 % beträgt (als Folge des bereits merklichen Mitnahmeeffekts), liegt er zwischen 0,05 und 20 Hz durchwegs unterhalb 3 %. Dabei ist der Anteil der zweiten Oberschwingung im allgemeinen etwa 10mal kleiner als derjenige der ersten, während der Anteil der dritten im allgemeinen nicht mehr messbar, das heisst kleiner als 0,1 % ist.

c) Zusammenfassung der Daten

Stromverbrauch: 5 A/6,3 V, 44 mA/300 V =

Erzeugbare Frequenzen: 0,01...20 Hz

Frequenzband mit einer Amplitudenkonstanz von ± 3 db: 0,03...10 Hz

Klirrfaktor bei 0,01 Hz: 30 %

Klirrfaktor bei 0,03 Hz: 9 %

Klirrfaktor 0,05 – 20 Hz: < 3 %

Maximale Ausgangsspannung: 30 V_{eff}

bei Stufe 1 (0,01...0,2 Hz) an 1 M Ω

bei Stufe 2 und 3 an 0,1 M Ω

Die in den Figuren 16...19 wiedergegebenen Photographien zeigen die wichtigsten Geräte, die beschrieben wurden.

Bibliographie

- [1] *Angenheister, G.* Bodenschwingungen. *Ergebn. exakt. Naturwissensch.* 15 (1936), 310...364.
- [2] *Barkhausen, H.* Lehrbuch der Elektronenröhren und ihrer technischen Anwendungen. Leipzig 1954.
- [3] *Berlage jun. H. P.* Seismometer. In: *B. Gutenberg. Handbuch der Geophysik.* Berlin 1932. Bd. 4, S. 299...526.
- [4] *Deketh, J.* Grundlagen der Röhrentechnik. = Philips' Bücherreihe über Elektronenröhren, Band 1. Eindhoven 1946.

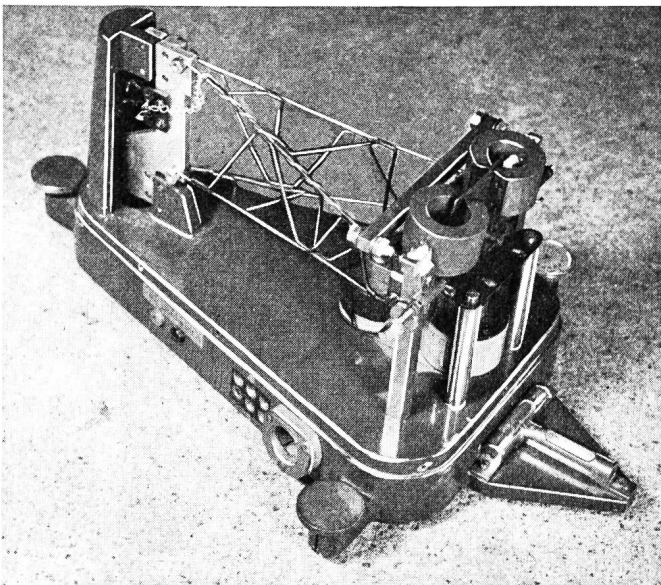


Fig. 17. Horizontalpendel

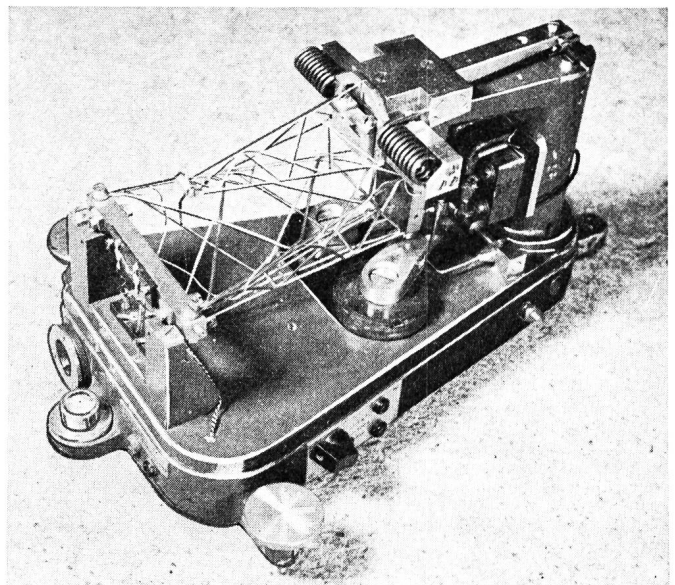


Fig. 18. Vertikalpendel

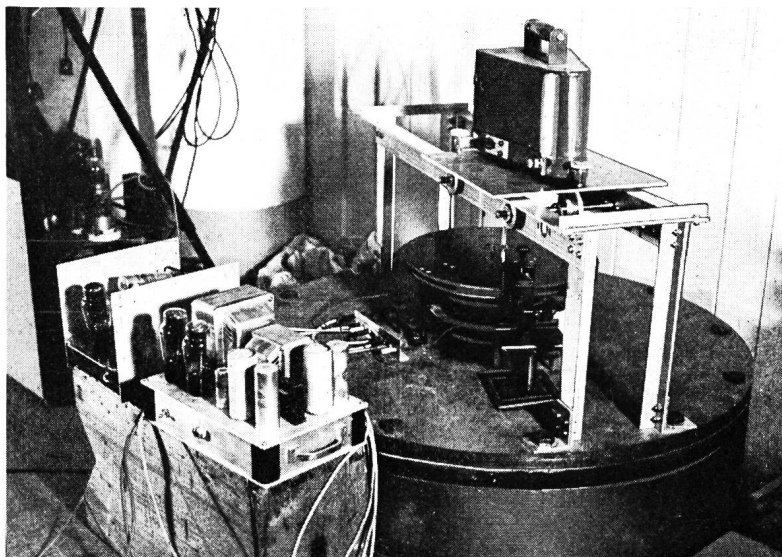


Fig. 19.
Der Schütteltisch mit «Horizontal»-Zusatz; im Vordergrund links, die Verstärker zum Antrieb

- [5] *Dreyfus-Graf, J.* L'oscillographe électro-dynamique «OED», encreur à pivots virtuels. *Microtecnie* **5** (1951), 26...27.
- [6] – Die elektro-dynamischen Oszillographen OED: Universal-Registrierinstrumente für Frequenzen zwischen 0 und 50 Hz. *Microtecnie* **7** (1953), 28...32.
- [7] *Calitzin, B.* Vorlesungen über Seismometrie. Leipzig 1914.
- [8] *Gassmann, F.* Zur Bestimmung von Bodenbewegungen aus Registrierungen von Schwingungsmessern und Seismographen. Festschrift SIA der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich. Zürich 1937.
- [9] – Zur Theorie der Schwingungsmesser. *Beitr. z. Geophys.* **52** (1938), 1...19.
- [10] – Über mechanische Empfänger von Seismographen und Schwingungsmessern. *Arch. f. Meteorol., Geophys. u. Bioklimat.* **3** (1951), 408...422.
- [11] *Hermann, A.* Piezoelektrische Beschleunigungsmesser hoher Empfindlichkeit ohne Verstärker. *Veröff. d. Reichsanst. f. Erdbebenforsch.* 1938, Heft 34, S. 25...72.
- [12] *Köhler, H.* Ein neuer Schütteltisch zur Eichung und Prüfung hochempfindlicher Erschütterungsmesser. *Z. f. techn. Phys.* **22** (1941), 209...215.
- [13] *Nyström, E. J.* Über den Gebrauch des harmonischen Analysators Mader-Ott. *Commentationes physico-mathematicae* **9** (1937), Heft 14.
- [14] *Schulcas-Sorokin, R. D.* Piezoelektrische Eigenschaften von Seignettesalzkristallen. *Z. f. Phys.* **73** (1932), 700...706.
- [15] *Thiessen, G. J.* R-C Filter Circuits. *J. Acoust. Soc. America* **16** (1945), 275...279.
- [16] *Vilbig, F.* Lehrbuch der Hochfrequenztechnik. Leipzig 1942.
- [17] *Walter, C. H.* Über eine neue Gleichrichtermessanordnung. *Z. f. techn. Phys.* **13** (1932), 363...367.
- [18] *Weber, M.* Beitrag zur Messung von Erschütterungen. Promotionsarbeit Eidg. Techn. Hochschule Zürich und *Helvetica Physica Acta* **22** (1949), 425...456.
- [19] – Eine neue Erschütterungsmessapparatur und ihre Anwendung. *Schweiz. Arch.* **5** (1951), 129...139.
- [20] – Theorie der Kombinationsseismographen. *Z. f. angew. Math. u. Phys. (ZAMP)* **4** (1953), 57...81.
- [21] – Über die Indikatorgleichung eines Seismometers. *Geofisica pura e applicata* **23** (1953), 3...7.
- [22] *Wiechert, E.* Theorie der automatischen Seismographen. Berlin 1903.

* * *

Denn die stets wiederkehrende Erfahrung als Forscher
wie als Lehrer hat mich überzeugt,
dass es kein wirksames Mittel zur Belebung und Vertiefung des Studiums
gibt als das Eindringen in das geschichtliche Werden der Probleme.

Wilhelm Ostwald