

## Werk

**Jahr:** 1935

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:11

**Digitalisiert:** Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

**Werk Id:** PPN101433392X\_0011

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0011](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0011)

**LOG Id:** LOG\_0076

**LOG Titel:** Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen

**LOG Typ:** section

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

## Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen

### XXII. Eichung von Fernschallempfängern

(Membranapparate und Undographen)

Von **Heinz Dobberstein**, Clausthal-Zellerfeld I — (Mit 10 Abbildungen)

Bei den künstlichen Sprengungen zur Erforschung der oberen Atmosphäre mittels Schallwellen wurden die Fernschallempfänger (vornehmlich der Membranapparat von Wiechert und der Undograph von Kühl) bislang nur dazu benutzt, die Schalleinsätze zu registrieren, und damit die Laufzeit des Schalles zu bekommen. Im übrigen begnügte man sich mit der allgemeinen Feststellung, daß bei Fernschall hauptsächlich Frequenzen um 5 Hz auftreten. Man war der Ansicht, daß keines der verwendeten Geräte zur unmittelbaren Auswertung der wahren Störungsfunktion geeignet sei\*). Aus der folgenden Arbeit geht aber hervor, daß die Schallaufzeichnungen der Membranapparate und Undographen an Hand ihrer entsprechenden Resonanzkurven sehr wohl zur Gewinnung des wirklichen Luftdruckverlaufes brauchbar sind. Es ist anzunehmen, daß die Entwicklung der Luftseismik ähnlich wie die der experimentellen Bodenseismik gehen wird. Dort begnügte man sich zuerst auch mit den Einsätzen der seismischen Wellen und lernte erst viel später die Wellenformen deuten und achtete dann bei der Konstruktion der Seismographen auf möglichst formgetreue Wiedergabe der Bodenbewegungen. Man wird also auch künftig in der Luftseismik, wie schon die Erfahrungen bei den Schallsprengungen im Polargebiet zeigten, nicht nur den Einsatz, sondern auch das ganze Schwingungsbild benutzen müssen, um die Schallphänomene der Atmosphäre weiter zu klären. So macht z. B. K. Wölken\*\*) auf einen Unterschied in den Wellenformen bei Sprengungen im Sommer und im Winter aufmerksam. Damit ergibt sich die Frage, wie weit es möglich ist, aus den Aufzeichnungen der verschiedenen Apparatetypen auf die wirklich einfallenden Wellenformen und Druckschwankungen zu schließen.

Um eine Schallregistrierung genauer analysieren zu können, muß man die Wiedergabetreue, d. h. die Resonanzkurve des betreffenden Schallempfängers kennen. Es genügt aber nicht, die für die bekannten theoretischen Resonanzkurven nötigen Konstanten wie Eigenfrequenz, Dämpfung und Empfindlichkeit zu bestimmen, sondern man muß die experimentell gewonnene Resonanzkurve zugrunde legen.

\*) Vgl. die Arbeiten des Preuß. Aeronaut. Observatoriums bei Lindenberg, Bd. XVI, Heft D, S. 3.

\*\*) K. Wölken: Schalluntersuchungen im Polargebiet, Zeitschr. f. Geophys. **10**, 222, (1934).

*A. Wirkungsweise der Fernschallempfänger*

Theoretisch sind die Verhältnisse bei den Schallempfängern eingehend von O. Meissner\*) und B. Gutenberg\*\*) behandelt worden. Die verschiedenen Empfängertypen kann man auf eine Kolbenmembran zurückführen und so mathematisch einfach behandeln. Man kommt so zu einer Differentialgleichung für den Ausschlag  $a$  des Registrierpunktes von der Form:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} + 2 \delta \frac{da}{dt} + \omega_0^2 a = \omega_0^2 V p_0 \sin \omega t \dots \dots \dots (1)$$

wenn dauernde sinusförmige Druckwellen von der Frequenz  $\omega$  und der Amplitude  $p_0$  den Schallempfänger treffen, dessen Eigenfrequenz  $\omega_0$ ,  $V$  seine statische Vergrößerung und  $\delta$  seine Dämpfungsconstante bedeuten.

Die Lösung ist:

$$a = \frac{V p_0 \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \delta^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi) \dots \dots \dots (2)$$

mit einer Phasenverschiebung  $\varphi$ , die der Gleichung genügt:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \delta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Führen wir noch die Resonanzüberhöhung  $\varrho$ \*\*\*), das ist das Verhältnis der Resonanzamplitude  $A_0$  ( $\omega = \omega_0$ ) zur Amplitude bei statischem Ausschlag  $A_{\omega=0}$ , ein:

$$\varrho = \frac{A_0}{A_{\omega=0}} = \frac{\omega_0}{2 \delta} = \frac{\pi}{d}$$

( $d = \log$ . Dämpfungsdekrement zweier aufeinanderfolgender gleichzeitiger Amplituden), und setzen wir ferner für das Frequenzverhältnis  $\omega/\omega_0 = z$ , so erhalten wir die dimensionslosen Gleichungen:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{\sqrt{z^4 + \varrho^2 (1 - z^2)^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{z}{\varrho (1 - z^2)} \dots \dots \dots (3)$$

Diese Gleichungen liefern die bekannten theoretischen Resonanzkurven. Eine solche Resonanzkurve ist für eine Resonanzüberhöhung  $\varrho = 2$  ( $d = 1.57$ ) in die Fig. 4 eingetragen (---).

Nun besitzen die Fernschallempfänger eine Öffnung, durch die sich ein Druckunterschied zwischen dem Außenraum und dem abgeschlossenen Luftvolumen allmählich ausgleichen kann. Sie ist notwendig, um die langperiodischen Luftdruckschwankungen von mehreren Sekunden Dauer auszugleichen, die z. B. durch

\*) O. Meissner: Die theoretischen Grundlagen der Schallregistrarapparate I. Als Manuskript gedruckt. Reichsanstalt für Erdbebenforschung, Jena 1929.

\*\*) B. Gutenberg: Gerlands Beitr. z. Geophys. 26, 34 (1930).

\*\*\*) Vgl. H. Barkhausen: Einführung in die Schwingungslehre, Leipzig 1932.

den veränderlichen Winddruck auf den Registrierraum hervorgerufen sind. Sie betragen manchmal bis zu einigen Hundertstel mm Hg und können bei der Empfindlichkeit der Apparate die Schallaufzeichnung erheblich stören. Eine solche Öffnung ist beim Undographen durch den Spalt zwischen Glimmerflügel und fester Wand gegeben, beim Membranapparat ist sie in Form eines veränderlichen Ausgleichskonus gesondert angebracht. Auch eine auf den Schallapparat fallende Druckwelle ist also nicht mit ihrer vollen Amplitude wirksam, da sich ein Teil des Druckunterschiedes zwischen Innen- und Außenraum durch die vorhandene Öffnung ausgleichen wird. Und zwar wird bei langsamen Druckwellen der an der Auffangfläche wirksame Druckunterschied geringer sein als bei schnellen, da dann die Luft Zeit genug findet, diesen Druckunterschied durch die kleine Öffnung hindurch auszugleichen.

Um den an der Auffangfläche wirksamen Druck zu bestimmen, machen wir folgenden Ansatz\*): Die Änderung des Druckunterschiedes  $p = p_{\text{außen}} - p_{\text{innen}}$  pro Zeitelement  $dp/dt$  setzen wir proportional dem gerade herrschenden Druckunterschied  $p$  (sie wird ihn zu verkleinern suchen). Ferner kommt hinzu die zeitliche Änderung der diesen Druckunterschied erzeugenden Funktion  $f(t)$ , d. h. der ankommenden Schallwelle, also:

$$\frac{dp}{dt} = -\gamma p + \frac{df(t)}{dt} \dots \dots \dots (4)$$

Dabei nehmen wir den Proportionalitätsfaktor  $\gamma$ , der durch die Größe und Form der Öffnung bedingt ist, als zeitlich konstant und frequenzunabhängig für alle vorkommenden Drucke an. Ferner ist hier die adiabatische Kompression der Luft im Gefäß durch die unter dem Einfluß des Druckunterschiedes  $p$  stattfindende Durchbiegung des Empfangssystems (z. B. der Membran) wegen ihrer Kleinheit vernachlässigt\*\*).

Ist nun die plötzlich einsetzende Druckwelle  $f(t) = p_0 = \text{konstant}$ , so heißt die Differentialgleichung:

$$\frac{dp}{dt} = -\gamma p,$$

und ihre Lösung

$$p = p_0 e^{-\gamma t},$$

d. h. der Druckunterschied gleicht sich nach einer  $e$ -Funktion aus. Auf diese Weise ist also  $\gamma$  bestimmbar.  $\gamma$  ist eine reziproke Zeit, und zwar ist  $\gamma = 1/\tau$ ,

\*) Eine ähnliche Rechnung hat M. Töpler: Ann. d. Phys. **12**, 788 (1903) für einen Luftdruckvariographen durchgeführt.

\*\*) Beim Membranapparat beträgt das Gefäßvolumen  $V = 2$  Liter. Einem Druckunterschied  $\Delta p = 1 \cdot 10^{-2}$  mm Hg entspricht eine Membrandurchbiegung von rund  $1 \mu$ . Nimmt man für die Durchbiegung Paraboloidform an (Membranradius 2 cm) so beträgt die Volumenänderung  $dV \sim 6.5 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> und die adiabatische Druckänderung im Inneren  $dp \sim 3.5 \cdot 10^{-4}$  mm Hg, also  $dp$  rund 3.5% von  $\Delta p$ . Für den Undographen sind die Werte noch günstiger.

wenn  $\tau$  die Relaxationszeit bedeutet, d. h. diejenige Zeit, in der ein Druckunterschied  $p_0$  auf den  $e$ -ten Teil abgesunken ist.

Ist aber, und das ist der hier für die Resonanzkurven interessierende Fall,  $f(t) = p_0 \sin \omega t$ , so wird:

$$\frac{dp}{dt} + \gamma p = p_0 \omega \cos \omega t.$$

Die allgemeine Lösung dieser inhomogenen Differentialgleichung lautet:

$$p(t) = e^{-\int \gamma dt} (C + \int p_0 \omega \cos \omega t \cdot e^{\int \gamma dt} dt),$$

wobei  $C$  eine Integrationskonstante bedeutet. Nach Ausrechnung der Integrale erhält man:

$$p(t) = C e^{-\gamma t} + \frac{p_0}{\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}}} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{mit} \quad \text{tg } \varphi = \frac{\gamma}{\omega}.$$

Das ist also die an dem Empfangssystem wirksame Druckfunktion, wenn die von außen herangeführte Druckwelle die Form  $p_0 \sin \omega t$  hat. Sie enthält zwei wohl unterscheidbare Summanden. Der eine stellt einen nach einer  $e$ -Funktion abklingenden Vorgang, den Einschwingvorgang, dar. Der andere, das stationäre Glied, ist eine Sinuswelle von derselben Frequenz wie die ankommende Welle, gegen diese aber frequenzabhängig phasenverschoben, und seine Amplitude geht mit  $\omega$  gegen Null, und mit wachsender Frequenz nähert er sich immer mehr der wirklichen Druckamplitude  $p_0$ .

Wenn zur Zeit  $t = 0$  die Druckwelle  $f(t) = p_0 \sin \omega t$  beginnt den Schallempfänger zu treffen, so ist  $p(0) = 0$  und die Konstante bestimmt sich zu:

$$C = \frac{-p_0 \cdot \gamma}{\omega \left(1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}\right)}.$$

Fragen wir nun, wann der Einschwingvorgang auf den zehnten Teil der Amplitude des stationären Zustandes abgeklungen ist, so muß dafür gelten:

$$\frac{p_0 \cdot \gamma}{\omega \left(1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}\right)} e^{-\gamma t} = \frac{p_0}{10 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}}},$$

also:

$$t = \frac{1 - \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{\omega^2}{\gamma^2}\right)}{\gamma \cdot \log e},$$

$t$  wird mit wachsender Frequenz und wachsendem  $\gamma$  (zunehmender Ausgleichsöffnung) kleiner.

Beim Undographen ( $\gamma \sim 32$ ) ist bei 1 Hz schon  $t < 10^{-1}$  sec, beim Membranapparat für ganz geschlossenen Ausgleichskonus ( $\rho \sim 2$ )  $t \sim 1$  sec. Nach dieser

Zeit, d. h. also nach spätestens einer Periode kann man die wirksame Druckamplitude praktisch als konstant ansehen, und es gilt dann im stationären Zustand:

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}}} \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{mit} \quad \text{tg } \varphi = -\frac{\gamma}{\omega} \dots \dots (5)$$

Diese Druckfunktion (5) ist nun an Stelle von  $p_0 \sin \omega t$  auf der rechten Seite der Schwingungsdifferentialgleichung (1) einzuführen, dann erhält man als Lösung für die Bewegung des Registrierpunktes  $a$  bei einer Druckausgleichsöffnung:

$$a = \frac{p_0 \omega_0^2 V}{\sqrt{\left(1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2}\right) \left((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \delta^2 \omega^2\right)}} \sin(\omega t - \psi) \dots \dots (6)$$

mit

$$\text{tg } \psi = \frac{-\gamma(\omega_0^2 - \omega^2) + 2 \delta \omega^2}{\omega(\omega_0^2 - \omega^2) + 2 \delta \gamma \omega}.$$

Und bilden wir auch hier entsprechend (3) die dimensionslosen Gleichungen:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{z \sqrt{\frac{\gamma^2}{\omega^2} + 1}}{\sqrt{(z^2 + \varrho^2(1 - z^2)^2) \left(\frac{\gamma^2}{\omega_0^2} + z^2\right)}} \dots \dots (7)$$

$$\text{tg } \psi = \frac{-\frac{\gamma}{\omega_0} \varrho (1 - z^2) + z^2}{z \cdot \left( (1 - z^2) \varrho + \frac{\gamma}{\omega_0} \right)}.$$

Für  $\gamma = 0$ , d. h. ohne Ausgleichsöffnung gehen die Gleichungen (6) und (7) in die ursprünglichen (2) und (3) über.

In die Fig. 4 ist eine der Gleichung (7) entsprechende Kurve (—) mit  $\varrho = 2$ ,  $\omega_0/2\pi = 11.5$  und  $\gamma = 32.1$  eingetragen. Das Amplitudenverhältnis fängt bei Null an und geht mit wachsendem Frequenzverhältnis allmählich in die Kurve nach Gleichung (3) (==) über.

### B. Eichmethoden

Zur Gewinnung experimenteller Resonanzkurven muß man mit dem zu untersuchenden Schallempfänger sinusförmige Druckwellen *konstanter* Amplitude und variabler Frequenz aufnehmen\*).

\*) Schon früher sind von Prof. Kühl am Meteorol. Inst. in Potsdam und von Dr. Mothes am Geophysikal. Inst. Göttingen Untersuchungen in dieser Richtung angestellt worden. Doch ist darüber, soweit mir bekannt, nichts veröffentlicht worden. Für die im folgenden beschriebene erste Methode wurden Teile der alten Göttinger Apparat von mir benutzt.

Diese Druckwellen wurden nach folgenden Methoden erhalten: In einem Raume des Geophysikalischen Institutes Göttingen (Inhalt etwa 56 cbm) kamte in einer kreisförmigen Öffnung der einen Wand ein leicht beweglicher Kolben, eine Platte von 30 cm Durchmesser, ähnlich dem einer Dampfmaschine, durch einen Exzenter (Hub 0.5 cm) von einem Elektromotor angetrieben, sinusförmig hin und hergehen und so die Luft des Raumes periodisch zusammendrücken und wieder ausdehnen. Die so erzeugte adiabatische Druckschwankung beträgt etwa  $7 \cdot 10^{-3}$  mm Hg. In dem Raum werden die zu untersuchenden Schallapparate aufgestellt und mit dem Kolben bei konstanter Amplitude ein Frequenzbereich von 1 bis 20 Hz durchlaufen. Der Vorteil dieser Methode ist der unmittelbare

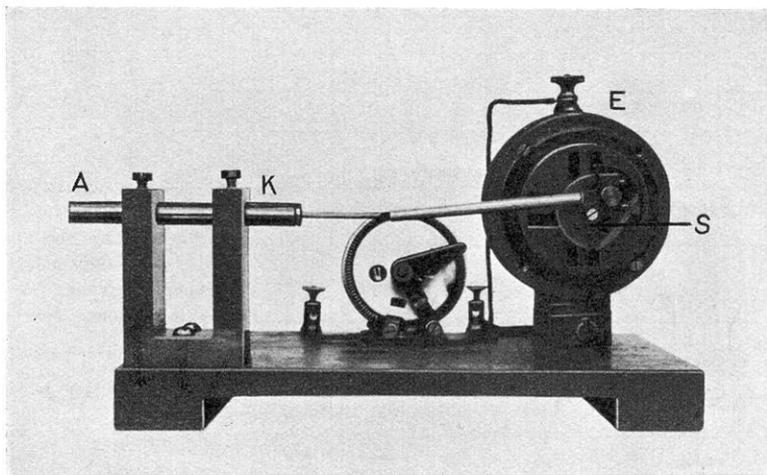


Fig. 1. Kleine Kolbenmaschine ( $\frac{1}{3}$  natürl. Gr.)

*E* Elektromotor, *S* verstellbarer Exzentrerschlitten, *K* Zylinder mit Kolben (0.6 cm Durchmesser),  
*A* Ansatz zum Gummischlauch

Vergleich verschiedener Apparatetypen miteinander, da sie den gleichen konstanten Druckschwankungen ausgesetzt werden. Sie ist aber nur bei niedrigen Frequenzen brauchbar, da sich schon von etwa 15 Hz ab die Eigenschwingungen des Luftraumes störend bemerkbar machen.

Bei einer zweiten Methode (Fig. 1) wird ein kleiner Kolben *K* von nur 0.6 cm Durchmesser benutzt, der durch einen verstellbaren Exzenter *S* mit der Achse eines kleinen Elektromotors *E* gekuppelt ist. Durch den verstellbaren Exzenter kann man bequem die so erzeugte Druckamplitude variieren. Vom Zylinder des Kolbens führt ein bei *A* aufgezogener etwa 50 cm langer\*) Druckgummischlauch

\*) Längere Gummischläuche geben in dem untersuchten Frequenzbereich bis 70 Hz störende Resonanzstellen durch Eigenschwingungen der in den Schlauch eingeschlossenen Luftsäule. So konnte mit einem Membranapparat durch Variation der

zu den Schallempfängern: Bei dem Undographen zu dem abgeschlossenen Luftvolumen des Registrierkastens von rund 78 cdm; beim Membranapparat zu dem Rohransatz eines Deckels, der an Stelle des Trichters luftdicht aufgeschraubt wird. Mit diesem kleinen handlichen Apparat lassen sich Frequenzen bis zu 80 Hz erzeugen; doch stellen so schnelle Schwingungen schon eine erhebliche Beanspruchung des Materials dar, und die Lager des Apparates müssen bald erneuert werden. Für die langsameren Schwingungen bis zu 30 Hz aber ist der Apparat lange brauchbar. Man kann mit diesem Apparat vor und — am besten auch —

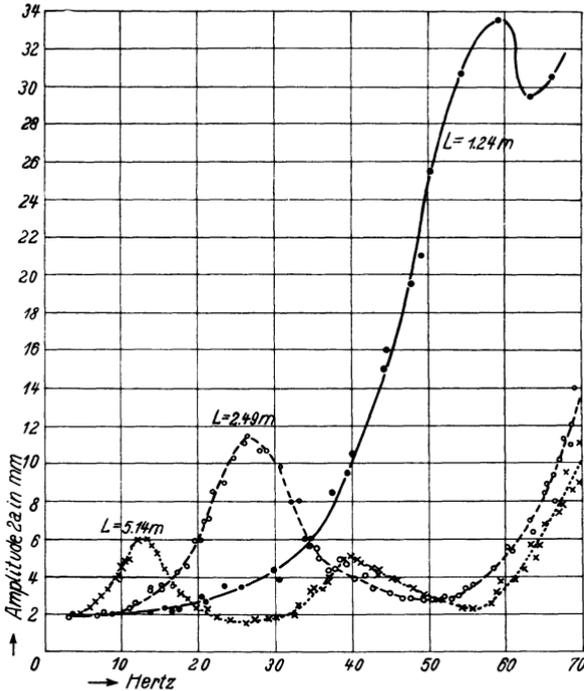


Fig. 2. Resonanzkurven des Membranapparates Nr. 2 in Abhängigkeit von der Länge  $L$  des Gummischlauches. Dämpfungskonus 12. Ausgleichskonus geschlossen

- 1.24 m;
- 2.49 m;
- ×—×— 5.14 m Schlauchlänge

nach jeder Sprengung leicht Resonanzkurven aufnehmen, um festzustellen, ob der Schallempfänger einwandfrei arbeitet.

Untersucht wurden nach diesen beiden Methoden verschiedene Typen von Membranapparaten von Wiechert und Kühlsche Undographen.

Länge (bis zu 5 m) eines Druckschlauches von 0.4 cm innerem und 1.4 cm äußerem Durchmesser ein Wandern der Resonanzstellen festgestellt werden (Fig. 2). Nimmt man an, daß die eingeschlossene Luftsäule am Kolben einen Schwingungsbauch und an der Membran einen Schwingungsknoten hat, sich in dem Schlauch also stehende Wellen der Länge  $\frac{1}{4} \lambda$  bzw.  $\frac{3}{4} \lambda$  ausbilden, so läßt sich nach Fig. 2 aus den Resonanzmaxima eine Schallgeschwindigkeit von rund 267 m/sec in diesem Druckschlauch berechnen (aus dem längsten Schlauch, da dort die Randeinflüsse am kleinsten sind).

C. Ergebnisse

I. *Undographen*. Bei dem Undographen von Kühl\*) ist das Schallempfangssystem eine kleine dünne Glimmerplatte, die an ihrer vertikal stehenden Mittellinie an einem Torsionsdraht, der die Richtkraft liefert, drehbar befestigt ist. Sie schließt wie eine Tür einen Luftraum von rund 78 cm ab, der gleichzeitig als Dunkelraum für die photographische Registrierung dient. Durch besondere Konstruktion werden beide Plattenhälften für den auffallenden Schall nutzbar gemacht.

Die Fig. 3 zeigt zwei nach beiden Eichmethoden aufgenommene Resonanzkurven des Undographen 28. Auf dem Film a) (Außenanregung durch den großen Kolben) sieht man außer dem eigentlichen Resonanzmaximum rechts noch ein:

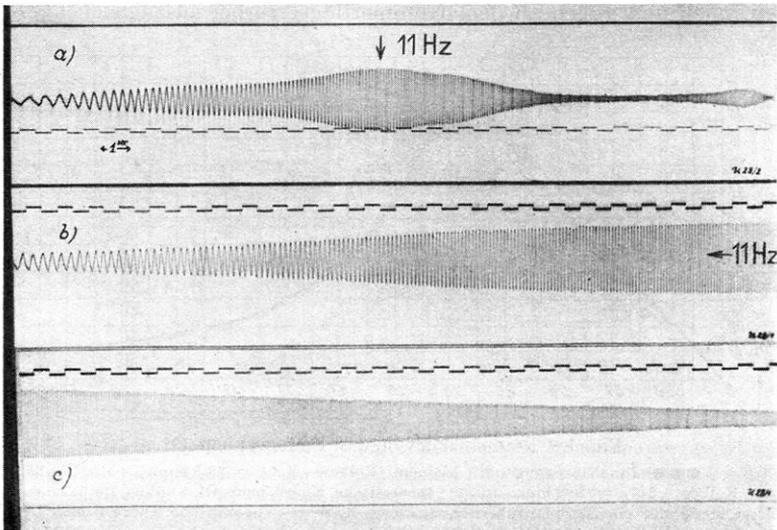


Fig. 3. Resonanzkurven des Undographen 28  
 a) Außenanregung durch den großen Kolben  
 b) und c) Innenanregung durch den kleinen Kolben

zweites kleineres Maximum, das durch eine Eigenschwingung des Untersuchungsraumes hervorgerufen ist. Der Film b) und c) ist durch Innenanregung mit dem kleinen Kolben gewonnen. Beide Eichmethoden geben, wie die Auswertung solcher Filme (Fig. 4) zeigt, bis 15 Hz recht übereinstimmende Kurven. Die Meßpunkte sind des besseren Vergleichs wegen in dimensionslosem Maß eingetragen. Die Eigenfrequenz des untersuchten Undographen Nr. 28 liegt bei 11,5 Hz, die zugehörige Doppelamplitude  $2 A_0$  war bei der benutzten Außenanregung mit dem großen Kolben ( $\times\times\times$ ) 20,2 mm, bei der Innenanregung mit dem kleinen Kolben ( $\bullet\bullet\bullet$ )

\*) Photographien von Undographen und Membranapparaten befinden sich in dem Artikel „Luftseismik“ von O. Meisser im Handbuch der Experimentalphys., Bd. 25, 3. Teil, S. 232ff.

28,5 mm. Zum Vergleich sind die theoretisch berechneten Resonanzkurven für eine Resonanzüberhöhung  $q = 2$  nach Gleichung (3) (ohne Berücksichtigung der Ausgleichströmung,  $\text{---}$ ) und nach Gleichung (7) (mit Berücksichtigung der Ausgleichströmung,  $\text{—}$ ;  $\gamma = 32.1$ ) eingetragen. Die  $\text{—}$  Resonanzkurve stimmt recht gut mit den experimentell gemessenen Punkten überein. Ab 15 Hz zeigen die durch Außenanregung mit dem großen Kolben erhaltenen Punkte ( $\times\times\times$ ) einen stärkeren Abfall, geben aber bei 23 Hz ein neues Maximum, das eine Eigenschwingung des Raumes sein muß, da es die Membranapparate dort auch geben. Daß die Meßpunkte unterhalb 7 Hz immer stärker von der bekannten ( $\text{---}$ ) theoretischen Resonanzkurve abweichen, findet seine Erklärung darin, daß eben bei langsamen Schwingungen die Luft Zeit genug hat, den Druckunterschied zwischen innen und außen an dem Glimmerflügel vorbei auszugleichen. Deshalb

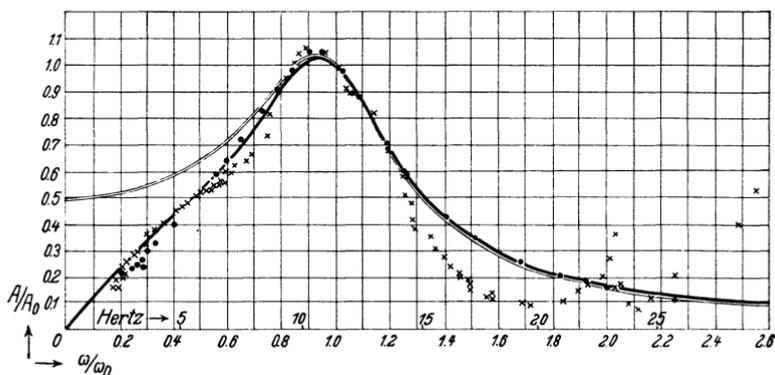


Fig. 4. Resonanzkurven des Undographen 28

$f_0 = 11.5$  Hz. ●●● Innenanregung mit kleinem Kolben.  $2 A_0 = 28.5$  mm.  $\times\times\times$  Außenanregung mit großem Kolben.  $2 A_0 = 20.2$  mm.  $\text{---}$ : theoretische Kurve nach Gl. 3 (ohne Berücksichtigung der Ausgleichsströmung) für eine Resonanzüberhöhung,  $q = 2$ .  $\text{—}$ : theoretische Kurve nach Gl. 7 (mit Berücksichtigung der Ausgleichsströmung) für  $q = 2$ ,  $\omega_0/2\pi = 11.5$  Hz,  $\gamma = 32.1$

wurde von mir im theoretischen Teil die Ausgleichströmung berücksichtigt, was zur Resonanzgleichung (7) führt. Sie gibt also genügende Übereinstimmung mit der Praxis. Andere von mir untersuchte Undographen zeigen dieselbe Form der Resonanzkurve, da sich der Spalt zwischen Glimmerflügel und der festen Wand aus praktischen Gründen nicht schmaler machen läßt.

II. Membranapparate. Bei dem Membranapparat von Wiechert (Fig. 5 gibt eine abgeänderte Form) ist ein Luftvolumen  $V$  von 2 bis 3 Litern gegen den durch einen Trichter  $Tr$  einfallenden Schalldruck durch eine dünne Gummimembran  $M$  dicht abgeschlossen. Die Gummimembran wird durch acht kleine Spiralfedern  $F$  über einer kreisförmigen Öffnung von etwa 4 cm Durchmesser so straff gespannt, daß ihre Eigenfrequenz (mit Übertragungssystem) über 40 Hz liegt (nach Entfernung des Spiegelübertragungssystems konnte ich bei einem untersuchten Apparat durch einen kleinen seitlich auf die Membran geklebten Spiegel bei normaler Spannung der Membran sogar eine Eigen-

schwingung von 103 Hz feststellen). Bei der ursprünglichen Wiechertschen Konstruktion des Spiegelübertragungssystems ist auf die Membran in der Mitte ein leichter Aluminiumkegel aufgeschraubt, in dessen vertiefte Spitze der Hebelarm des Spiegelübertragungssystems drückt. Das Spiegelsystem ist ein in einem Rahmen durch eine Feder festgespannter dünner Torsionsdraht von etwa  $40 \mu$  Dicke, der in der Mitte den Spiegel mit einem seitlich angelöteten kleinen Hebelarm trägt. Die Torsionseigenschwingung betrug bei dem untersuchten Apparat 10.6 Hz. Die Eigenschwingung des Systems Membran + Spiegelübertragung lag dann bei 85 Hz. Aus der durch mechanischen Stoß angeregten Eigenschwingung ergab sich ein log. Dämpfungsdekrement von  $d \sim 0.016$ , dem eine 200fache Resonanz-

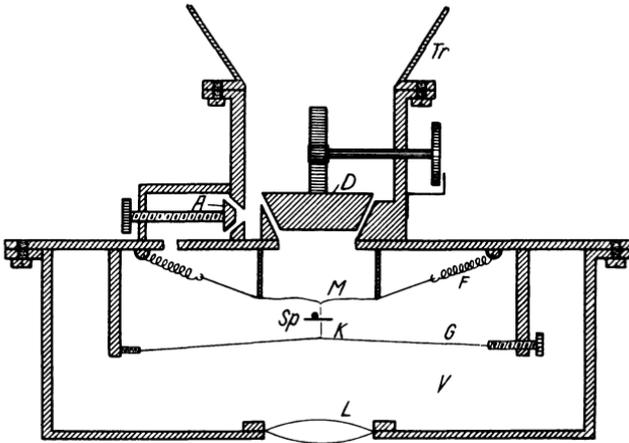


Fig. 5. Schematischer Schnitt durch einen Membranapparat

$V$  ist das durch die Gummimembran  $M$  gegen den durch den Schalltrichter  $Tr$  einfallenden Schalldruck abgeschlossene Luftvolumen.  $F$  Federn zum Spannen der Membran.  $Sp$  Spiegel mit starrer Achse (die Lagerung derselben und ein Hilfsspiegel sind der besseren Übersicht halber fortgelassen).  $K$  Kontakten von  $40 \mu$  Dicke, mit dem einen Ende an der Membran  $M$  befestigt, dann einmal um die Spiegelachse geschlungen und mit dem anderen Ende durch den Gummifaden  $G$  gespannt.  $D$  Dämpfungskonus.  $A$  Ausgleichskonus.  $L$  Linse

überhöhung entspricht. Die mit diesem Membranspiegelsystem aufgenommenen Resonanzkurven zeigen Maxima bei  $1/2$ ,  $1/3$  bis sogar zu  $1/6$  Hertzzahl der Eigenfrequenz, da es mechanisch nicht möglich ist, den Kolben für eine so geringe Dämpfung des Membranspiegelsystems wegen des immer vorhandenen Spieles in den Lagern und des kurzen Exzenterarmes genügend rein sinusförmig zu bewegen. Mit den verschiedensten Mitteln wurde versucht, das System stärker zu dämpfen; aber nur mit geringem Erfolge. Etwas besser wurde es, als an Stelle des Torsionsdrahtes eine starre Achse eingebaut wurde, die sich in Achatlagern drehte. Der an die Achse angelötete Hebelarm wurde in die Spitze des Aluminiumkegels mit Gummilösung eingekittet. So gelang es wenigstens bis 25 Hz die störenden Eigenschwingungen sehr klein zu halten. Am besten aber bewies sich die folgende in Fig. 5 dargestellte Konstruktion des Spiegelsystems, die der bei Seismographen mit optischer Registrierung üblichen nachgebildet ist.

Von der Mitte der Gummimembran führt ein feiner Kokonfaden von  $40 \mu$  Dicke einmal um eine in Achathütchen gelagerte Stahlachse von 1 mm Durchmesser (die Lagerung ist in der Zeichnung der besseren Übersicht halber fortgelassen), an der ein kleiner Spiegel  $Sp$  von 8 mm Durchmesser befestigt ist, herum und wird dann durch einen Gummifaden (Kuponring)  $G$  straff gespannt gehalten. Der Gummifaden wird so stark gespannt, daß seine Saiteneigenschwingung über der der Membran liegt, damit der Spiegel auch hohen Schwingungszahlen leicht folgen kann. Durch diese Anordnung wird gleichzeitig der Membran eine gewisse Vorspannung gegeben, und dadurch ihre Eigenschwingung sehr stark gedämpft, die noch durch Öltröpfchen in den Achatlagern erhöht wird. Das Licht fällt durch die Linse  $L$  auf den Spiegel  $Sp$ . Zur Verdoppelung der Vergrößerung befindet sich im Innern des Apparates noch ein Hilfsspiegel, der in der Zeichnung fortgelassen ist.

Der Membranapparat besitzt einen „Dämpfungskonus“  $D$ . Er dient zur Abschwächung der die Membran treffenden Schallenergie. An einer Schraube mit einer Skale von 0 bis 40 kann man die gewünschte Dämpfung einstellen. Die Stellung 0 bedeutet, daß die Membran völlig gegen den Außendruck abgeschlossen ist; in der Stellung 40 gibt der Dämpfungskonus den größten Luftspalt frei. Die Fig. 6 zeigt Resonanzkurven eines Membranapparates in Abhängigkeit von den verschiedenen Stellungen des Dämpfungskonus, angeregt durch den kleinen Kolben (der weiter unten beschriebene Ausgleichskonus war bei diesen Aufnahmen geschlossen). Die Dämpfung ist selektiv. Bei enger Konusstellung (4) haben wir schon von 3 Hz ab abnehmende Empfindlichkeit. Mit der Stellung 8 haben wir (zufällig) gleichbleibende Empfindlichkeit bis 80 Hz. Bei weiter Konusstellung (12 und darüber) ist die Empfindlichkeit nur bis 20 bis 25 Hz gleichbleibend, dann steigt sie an bis zur Resonanzstelle der Membran, die bei diesen Aufnahmen über 100 Hz lag (der Dämpfungskonus hat also einen ähnlichen, aber umgekehrten Einfluß auf die Energieströmung wie der Ausgleichskonus). Aus dieser Figur sieht man, daß also ein Membranapparat in dem für Fernschall in Frage kommenden Frequenzbereich *konstante* Vergrößerung hat und ihn also naturgetreu aufzeichnet. Man muß nur dafür sorgen, daß die Eigenschwingung des Apparates genügend gedämpft und der Schallaufzeichnung nicht überlagert ist.

Der Membranapparat besitzt ferner einen Ausgleichskonus  $A$ , der eine direkte Verbindung des abgeschlossenen Luftvolumens mit dem Schallraum herstellt. Er dient zum Ausgleich der langperiodischen Luftdruckschwankungen von mehreren Sekunden Dauer, die z. B. durch den veränderlichen Windruck auf den Registrierraum hervorgerufen sind. Die Öffnung des Ausgleichskonus hat natürlich einen Einfluß auf die Resonanzkurve (ähnlich wie beim Undographen der Spalt). Die Fig. 7 zeigt zwei Resonanzkurven für geschlossenen (●●●) und für ganz geöffneten (○○○) Ausgleichskonus; die entsprechenden Relaxationszeiten betragen etwa 3 bzw. 1 Sekunde. Ein wesentliches Absinken der Empfindlichkeit bei geöffnetem Ausgleichskonus ist nur bis 4 Hz festzustellen; während bei geschlossenem Konus sogar bis unter 1 Hz konstante Vergrößerung herrscht.

Aus den Fig. 6 und 7 ist ersichtlich, daß die hörbaren Störschallfrequenzen (z. B. irgendwelche Geräusche von vorbeifahrenden Autos usw.) mit dem Dämpfungskonus und der Windeinfluß mit dem Ausgleichskonus stark zu dämpfen sind. Im Fernschallbereich von 3 bis 10 Hz ist dagegen der Einfluß der beiden Konusse unter 10%.

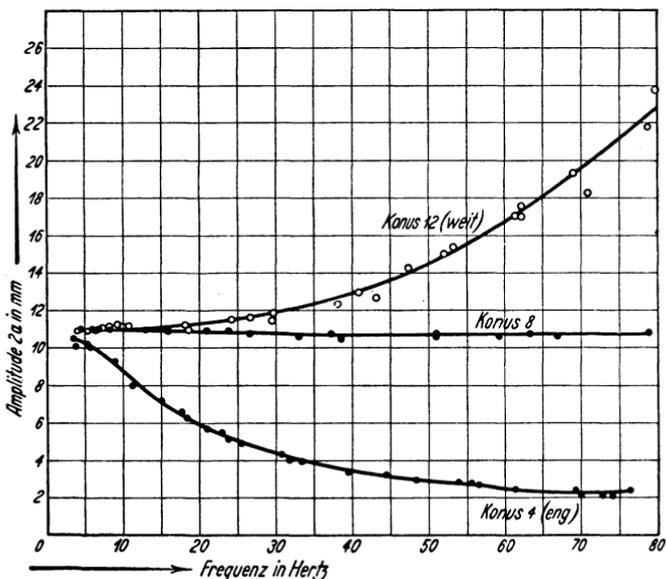


Fig. 6. Resonanzkurven des Membranapparates Nr. 2 in Abhängigkeit von der Stellung des Dämpfungskonus. Ausgleichskonus geschlossen. Anregung mit kleinem Kolben

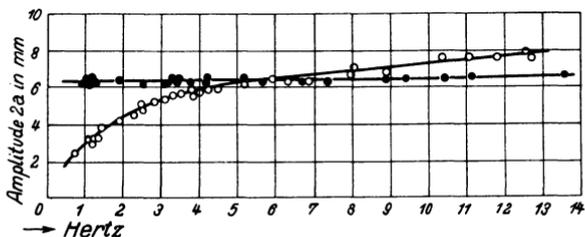


Fig. 7. Resonanzkurven eines Membranapparates für verschiedene Stellungen des Ausgleichskonus. Dämpfungskonus 12. Mit kleinem Kolben

- Ausgleichskonus geschlossen, Relaxationszeit  $\tau \sim 3$  sec
- ○ ○ Ausgleichskonus offen,  $\tau \sim 1$  sec

Wiechert hat auch einen Membranapparat mit Registrierung in Ruß konstruiert. Auf einen Holzkasten von 500 Liter Inhalt ist eine kreisförmige Aluminiummembran von 44.5 cm Durchmesser und 0.1 mm Dicke gespannt. Durch eine 200fache Hebelübersetzung wird die Membrandurchbiegung in Ruß auf-

gezeichnet. Die Fig. 8 gibt die Resonanzkurven dieses Apparates wieder, angeregt durch den großen Kolben, mit (●●●) und ohne (○○○) Paraffinöldämpfung. Auch hier ist die Vergrößerung bei Öldämpfung zwischen 3 und 6 Hz ziemlich konstant, aber sehr gering. 1 mm Ausschlag oder  $5 \mu$  Membrandurchbiegung entspricht nach der Eichung etwa  $\Delta p = 3.5 \cdot 10^{-3}$  mm Hg plötzliche Druckänderung im Außenraum bei 3 bis 6 Hz. Die Druckänderung im Holzkasten ist rund fünfmal kleiner.

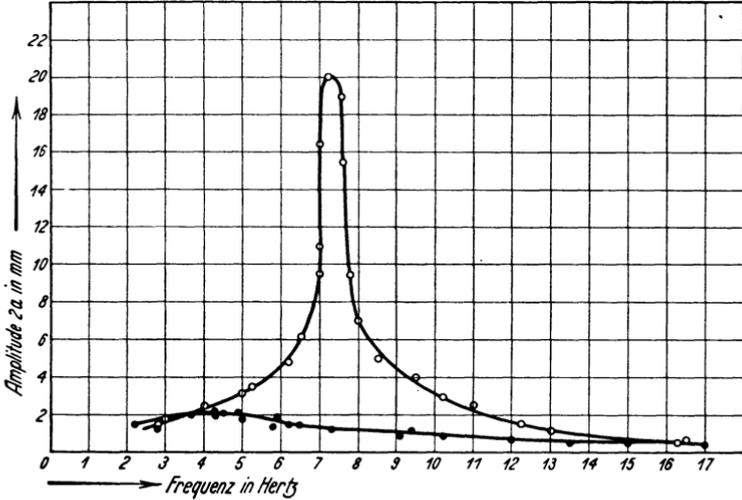


Fig. 8. Resonanzkurven des in Ruß schreibenden Membranapparates, angeregt durch den großen Kolben  
 ○ ○ ○ ohne Dämpfung, ● ● ● Paraffinöldämpfung

Die Tabelle gibt eine Zusammenstellung der Daten der verschiedenen Fernschallempfängertypen. Danach zeigen die Undographen in dem Fernschallfrequenz-

Tabelle

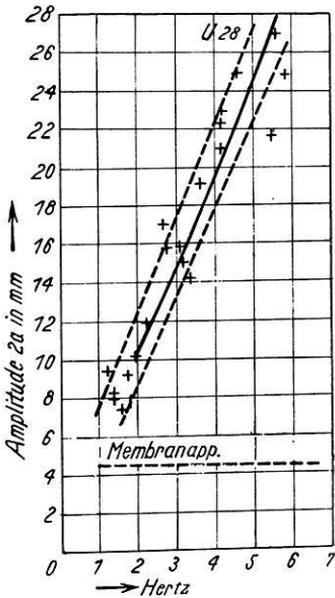
Apparat	Registrierart	Statische Vergrößerung	Empfindlichkeit, die 1 mm Ausschlag entspricht
Gummimembran . . . . .	photograph.	8000	$1 \cdot 10^{-3}$ mm Hg bei 1 bis 25 Hz
Aluminiummembran . . . . .	Ruß	200	$3.5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg „ 3 .. 6 Hz
Undograph 28 . . . . .	photograph.	2000	$1 \cdot 10^{-3}$ mm Hg „ 3.5 Hz
			$0.5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg „ 8 Hz
			$0.3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg „ 10 Hz

gebiet im allgemeinen eine größere Empfindlichkeit als die Membranapparate, aber sie ist stark frequenzabhängig, während das bei den Membranapparaten nicht der Fall ist.

#### D. Anwendungen

Im Gelände konnten Fernschallaufnahmen mit den geeichten Apparaten nicht gemacht werden, da seit Dezember 1932 große Sprengungen zur Er-

forschung der Schallausbreitung nicht stattgefunden haben. Aber von der letzten Schallsprengung in Oldebroek am 15. Dezember 1932 haben O. Meisser und H. Martin in der Zeitschrift für Geophysik **10**, 158 (1934) vergleichende Aufnahmen von einem Wiechertschen Gummimembranapparat und einem Kühlschen Undographen an demselben Ort (98 km vom Sprengort) veröffentlicht. Legt man für die dort benutzten Apparate, den Undographen U 15/S 14b und einen Membranapparat, die hier gefundenen Eichresultate zugrunde, so muß die Schallaufzeichnung auf Grund der für Undographen geltenden Resonanzkurve auf die eines Membranapparates, der ja im Fernschallgebiet konstante Vergrößerung hat, umrechenbar sein. Das wurde mit der Schallaufzeichnung der dritten Sprengung



Vergleich von Membranapparat und Undograph auf Grund einer Sprengaufzeichnung. Die Undographenamplituden sind auf konstante Amplitude des Membranapparates reduziert. — Zum Vergleich ist die Resonanzkurve des Undographen U28 eingezeichnet

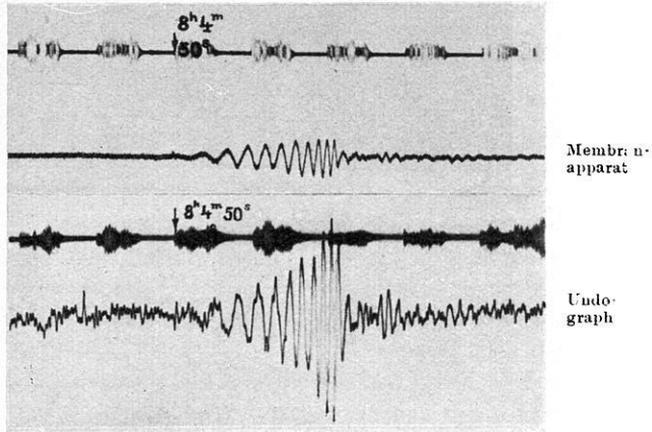


Fig. 9

gung in Oldebroek [Fig. 9, rechts sieht man die Reproduktion der Aufnahmen (die Zeitachse läuft von links nach rechts!) in der Weise versucht, daß man aus diesen Vergleichsaufnahmen die Resonanzkurve des Undographen bestimmt. Die Schwingungen vom Membranapparat und Undographen wurden einzeln ausgemessen und ergaben 21 Wertepaare. Die aufgezeichneten Frequenzen von 1.5 bis 6 Hz stimmen bei beiden Apparaten recht gut überein (größte Abweichung  $1/2$  Hz). Ein Membranapparat hat nach meinen Messungen in diesem Frequenzbereich konstante Vergrößerung. Die Amplituden beider Apparate auf dem Film aber schwanken. Alle Amplituden des Undographen wurden auf eine konstante Amplitude  $2a = 4.5$  mm des Membranapparates ungerechnet. Es wurde das Verhältnis der entsprechenden Amplituden von beiden Apparaten gebildet, mit 4.5 multipliziert und in die linke Figur der Fig. 9 eingetragen. Die Filme standen

mir nur in ihrer Reproduktion zur Verfügung, deshalb ist der Ablesefehlerbereich verhältnismäßig groß. Er ist in der Figur durch die gestrichelten Linien angedeutet. Dann liegen aber auch fast alle Punkte in diesem Bereich. Zum Vergleich ist das entsprechende Stück der experimentellen Resonanzkurve des Undographen 28 eingezeichnet (es mußte mit dem Faktor 2 multipliziert werden, um in den Druck- und Empfindlichkeitsbereich des Jenaer Undographen zu kommen). Wie man sieht, ist die Übereinstimmung überraschend gut.

Die Fig. 10 zeigt die Schallregistrierungen zweier Membranapparate von derselben Schallsprengung (Sennelager am 5. Dezember 1927 um 14 Uhr, Sprengladung 300 kg, Beobachtungsort: Geophysikalisches Institut Göttingen, Ent-

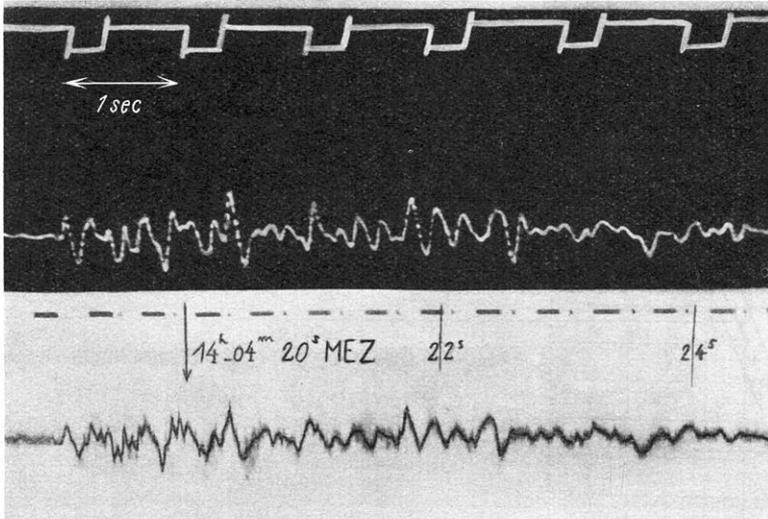


Fig. 10. Gleichzeitige Schallaufzeichnung zweier Membranapparate  
 a) in Ruß schreibender Membranapparat, b) Gummimembranapparat

fernung 88 km). Die Kurve a) gibt die Registrierung des in Ruß schreibenden Membranapparates wieder. Sie mußte 5.2fach vergrößert werden, damit ihre Zeitachse mit der der Registrierung b), die mit einem Membranapparat mit Gummimembran gemacht wurde, übereinstimmt. Der Gummimembranapparat besaß noch das Wiechertsche Spiegelübertragungssystem mit dem Torsionsdraht. Deshalb ist seine Aufzeichnung dauernd von der ungedämpften Eigenschwingung des Apparates von etwa 60 Hz überlagert. Der Deutlichkeit halber ist die eigentliche Schallkurve eingezeichnet. Die Kurven a) und b) stimmen bei den langsamen Schwingungen von etwa 5 Hz in Form und Amplitude recht gut überein. Ihre Amplituden verhalten sich etwa wie 1 : 4 (in Einklang mit meinen Empfindlichkeitsbestimmungen). Die Steilheit der Schwingungen der Kurve a) ist durch den kurzen Schreibhebelarm des Rußapparates hervorgerufen (die Feder schreibt

einen Kreisbogen von kleinem Radius statt eines geradlinigen Ausschlages). Die kleinen schnellen Schwingungen von etwa 18 bis 20 Hz des Gummimembranapparates in der Kurve b) sind in der Rußschreiberkurve a) nicht zu finden, da sie weit oberhalb von dessen Eigenfrequenz liegen (vgl. die Resonanzkurve Fig. 8).

Abschließend läßt sich sagen, daß zur Bestimmung der Zeit des Schalleinsatzes Undographen und Membranapparate gleichwertig sind. Will man aber darüber hinaus aus der Schallaufzeichnung den wahren Druckverlauf des Fernschalles erkennen, so sind die Gummimembranapparate vorzuziehen, da sie infolge ihrer hohen Eigenfrequenz im Fernschallgebiet konstante Vergrößerung zeigen und also eine naturgetreue Aufzeichnung geben. Aus den Undographenregistrierungen erhält man dagegen die wahre Druckfunktion immer erst mit Hilfe der zugehörigen Resonanzkurve.

### *Zusammenfassung*

1. Es werden zwei Methoden zur Eichung von Fernschallempfängern von 1 bis 20 bzw. 80 Hz beschrieben und mit ihnen Resonanzkurven von Membranapparaten und Undographen aufgenommen, und so die verschiedenen Apparatetypen miteinander verglichen.

2. Infolge einer Druckausgleichsöffnung weicht die experimentelle Resonanzkurve von der bekannten theoretischen Kurve ab. Es wird für diesen Fall die Indikatorgleichung und eine neue theoretische Resonanzkurve abgeleitet. Letztere stimmt mit der experimentellen Kurve gut überein.

3. Die Spiegelübertragung beim Gummimembranapparat wird geändert und die störende Eigenschwingung dadurch stark gedämpft. Der Membranapparat hat einen Ausgleichskonus zur Abdämpfung langsamer Windschwankungen und einen Dämpfungskonus zur Schwächung von Störgeräuschen. Beide Konusse, die je nach Bedarf eingestellt werden können, beeinflussen die Amplituden der Fernschallfrequenzen (3 bis 10 Hz) dagegen nur unwesentlich. Der Membranapparat besitzt im Fernschallbereich konstante Vergrößerung; aus den Undographenaufzeichnungen können erst mit Hilfe der Resonanzkurven die wahren Schalldruckamplituden gewonnen werden.

4. An Hand einer gleichzeitigen Fernschallaufzeichnung von Membranapparat und Undograph kann gezeigt werden, daß die Schallkurven beider Apparate mittels ihrer Resonanzkurven in Übereinstimmung zu bringen sind. Fernschallaufzeichnungen mit zwei verschieden konstruierten Membranapparaten a) Aluminiummembran, Rußregistrierung; b) Gummimembran, photographische Registrierung) zeigen weitgehende Übereinstimmung. Die Unterschiede erklären sich aus den verschiedenen Eigenschwingungen.

Herrn Prof. Dr. G. Angenheister möchte ich auch an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit, sein stets förderndes Interesse und die Bereitstellung der Mittel danken. Ebenso danke ich auch Herrn Mechaniker W. Riehn für seine Hilfe beim Bau der Eichapparatur und den Veränderungen der Schallapparate.

*Göttingen, Geophysikalisches Institut, August 1935.*