

## **Werk**

**Jahr:** 1941

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:17

**Werk Id:** PPN101433392X\_0017

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X\\_0017](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X_0017) | LOG\_0048

## **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

### **XLII. Vergleich der Aufzeichnung von Luftdruckschreibern und Luftdruckvariographen bei der Schallsprengung am 16. August 1939 in Jüterbog**

Von **G. A. Suckstorff**, Göttingen †. — (Mit 7 Abbildungen)

Die bei Schallsprengungen eingesetzten Fernschallempfänger wurden bisher fast ausschließlich dazu benutzt, die Laufzeit des Schalles festzustellen, d. h. man benötigte in den Registrierungen nur den Zeitpunkt des Einsatzes der verschiedenen Wellen, ohne aus der Form der Wellen Schlüsse zu ziehen. Eine Berücksichtigung der Wellenform würde aber ebenso wie in der Erdseismik wahrscheinlich wesentliche Schlüsse über die Lebensgeschichte der Schallwelle längs ihrer Bahn ermöglichen.

Im Anschluß an die große Schallsprengung in Oldebroek 1932 führte Dobberstein im Geophysikalischen Institut in Göttingen Untersuchungen durch, wie weit die Aufzeichnungen der beiden fast ausschließlich bei Schallsprengungen verwendeten Schallempfänger — dem Kühlschen Undographen und dem Wiechertschen Membranschreiber — miteinander vergleichbare Schallkurven ergaben. Er kam dabei zu dem Ergebnis, daß die von beiden Apparaten an einem Ort aufgezeichneten Schallkurven mittels ihrer Resonanzkurven in Übereinstimmung gebracht werden konnten, und gab zwei Methoden zur Gewinnung der Resonanzkurve an [Zeitschr. f. Geophys. **11**, 362 (1935)].

Die meisten bisher praktisch eingesetzten Schallempfänger geben nicht den wahren Luftdruckverlauf wieder, sondern sind als Luftdruckvariographen anzusehen, d. h. sie zeichnen für hohe Frequenzen annähernd den wahren Luftdruckverlauf  $p$  als Funktion der Zeit  $t$  auf, für mittlere und niedere Schallfrequenzen dagegen wird in grober Annäherung die zeitliche Änderung des Luftdruckes  $dp/dt$  als Funktion von  $t$  aufgeschrieben. Die bekannte Theorie der Luftdruckvariographen kann dabei sinngemäß auf die Schallapparate angewandt werden. Der wahre Druckverlauf ist, allerdings nur in unmittelbarer Nähe der Sprengstelle, einige Male von Ritter untersucht worden.

Eine Schallaufzeichnung in 215 km Entfernung vom Sprengort, die der Aufzeichnung des wahren Druckverlaufes gleichwertig sein mußte, wurde schon 1924 von Angenheister gewonnen, indem er das Fenster eines geschlossenen Zimmers durch ein dünnes Blech ersetzte und die Bewegungen dieses Bleches über einen Spiegel vergrößert photographisch aufschrieb bzw. ausmaß. Da das Zimmer natürlich nicht als luftdicht anzusehen ist, arbeitete er praktisch mit einem Luft-

druckvariographen, der jedoch eine sehr große Relaxationszeit gehabt haben muß, so daß die Abweichungen des gemessenen Druckverlaufes vom wahren Druckverlauf nur unwesentlich gewesen sein können. Aus dieser Aufzeichnung in 215 km Entfernung folgte eine Druckamplitude von  $10^{-2}$  bis  $10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup> und eine Druckfrequenz von 5 bis 7 sec<sup>-1</sup> [Zeitschr. f. Geophys. **1**, 20 u. 314 (1924/25); **2**, 88 (1926)].

Während der Schallsprengungen am 16. August 1939 wurde im Geophysikalischen Institut in Göttingen mit 4 Membranschreibern verschiedener Konstruktion an zwei etwa 80 m voneinander entfernten Punkten der Schall registriert. Dabei waren zwei als Luftdruckschreiber und ein als Luftdruckvariograph wirkender Membranschreiber im „Gaußhaus“, einem Holzhaus mitten im Garten des Institutes, aufgestellt. Ein weiterer Luftdruckvariograph registrierte im Turm des Institutsgebäudes.

Die dabei gestellten Aufgaben waren folgende:

1. Festlegung der verschiedenen Schalleinsätze als Station im großen Netz der Schalluntersuchung.
2. Aufzeichnung des wahren Luftdruckverlaufes einer Schallwelle in größeren Entfernungen vom Sprengort zu gewinnen, wobei durch zwei verschieden gebaute Druckschreiber mit verschiedenen Empfindlichkeiten die Aufzeichnung auch bei sehr großen Druckschwankungen durch Windeinfluß usw. gesichert sein sollte.
3. Vergleich des von einem Luftdruckvariographen aufgezeichneten Druckverlaufes mit der von einem der obengenannten Druckschreiber gelieferten Registrierung.
4. Untersuchung des Einflusses des Aufstellungsraumes an dem Zustandekommen der aufgezeichneten Schallkurven durch gleichzeitige Aufzeichnung der gleichen Schallwelle in zwei völlig verschiedenen Räumen.

Zur Aufzeichnung der Schallsprengung am 16. August 1939 wurden vier verschiedene Apparate benutzt. Bei allen vier Apparaten wurde die Bewegung der Membran durch Seilzug um eine Spiegelachse auf einen Spiegel übertragen, wie bei den Erschütterungsmessern des Geophysikalischen Instituts in Göttingen\*).

1. Ein Membranschreiber mit den seinerzeit von Dobberstein vorgenommenen Änderungen, die in der eingangs erwähnten Arbeit im einzelnen begründet und erläutert sind. Es sei deshalb wegen aller Einzelheiten auf diese Arbeit verwiesen. Hier möge eine kurze Beschreibung an Hand der Fig. 1 genügen, die gleichfalls der Arbeit von Dobberstein entnommen ist. Der Schalldruck wirkt über einen durch den beweglichen Konus  $D$  veränderlichen Zylinder-spalt auf eine an acht Spiralfedern  $F$  über einen Rohrstützen gespannte Membran  $M$ . Zwischen der Membran und einem ihr gegenüber ausgespannten Gummifaden  $G$  ist ein dünner Kokonfaden einmal um eine Achse von 1 mm Durchmesser geschlungen und gespannt. Die Vertikalbewegungen der Membran werden dadurch

\*) Siehe G. Angenheister, Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften Bd. XV, S. 316 (1936).

in Drehbewegungen der mit einem Spiegel versehenen Achse umgesetzt. Diese Spiegelbewegungen werden mit Hilfe der Linse  $L$  vergrößert aufgezeichnet. Die Membran  $M$  bildet den elastischen Abschluß eines starren Behälters von etwa 2 Liter Inhalt. Durch einen zweiten Zylinderspalt, dessen Weite durch einen Konus  $A$  verändert werden kann, steht dieser Behälter mit der Außenluft in Verbindung. Wir haben dann einen Luftdruckvariographen mit variabler Ausgleichsöffnung vor uns. Dieser Apparat ist in den folgenden Ausführungen mit  $M_3$  bezeichnet.

2. Ein zweiter Membranschreiber mit der ursprünglich gleichen Konstruktion wie der eben beschriebene wurde folgendermaßen geändert. Statt die Membran  $M$  nur mit Spiralfedern über den Rohrstutzen zu spannen, wurde sie mit einem

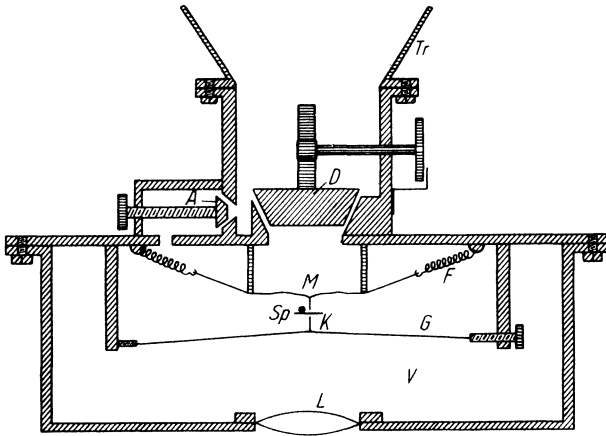


Fig. 1. Schnittzeichnung durch den Membranapparat.  
[Aus der Zeitschr. f. Geophys. 11, 371 (1935)]

Messingring luftdicht auf einem am oberen Ende des Rohrstutzens angebrachten Flansch gepreßt. Dadurch wurde erreicht, daß bei völligem Schließen des Konus  $A$  der Fig. 1 der Behälter des Membranschreibers völlig luftdicht abgeschlossen wurde, so daß der Apparat als Druckschreiber arbeitet. Im Gegensatz dazu gelingt es selbst bei völlig geschlossenem Ausgleichskonus  $A$  in einem Apparat nach Art der Fig. 1 nicht diesen luftdichten Abschluß zu erreichen, denn die Membran kann wegen ihrer geringen Dicke nicht genügend straff über den Rohrstutz gespannt werden. Ein Membranschreiber nach der Art der Fig. 1 arbeitet infolgedessen bei sehr niedrigen Luftdruckfrequenzen — auch bei völlig geschlossenem Ausgleichspalt — als Luftdruckvariograph. Abgesehen von der anderen Einspannung der Membran entspricht dieser zweite Membranschreiber in allen Einzelheiten der Konstruktion dem vorher beschriebenen Membranschreiber  $M_3$ . Lediglich um seine Vergrößerung herabzusetzen, wurde der Durchmesser der Spiegelachse verdoppelt. Dieser Apparat ist in den folgenden Ausführungen mit  $M_4$  bezeichnet.

3. Die Fig. 2 stellt einen der beiden völlig gleich gebauten Feindruckschreiber dar, die gleichfalls zu Schallaufzeichnungen verwendet wurden. Sie waren an und für sich als Druckmesser in Verbindung mit einem Staurohr zur Aufzeichnung sehr kleiner Windgeschwindigkeiten gebaut. Die Konstruktion geht wohl mit genügender Klarheit aus der Photographie Fig. 2 hervor. Eine als Grundplatte dienende Aluminiumplatte von 20 cm Durchmesser trägt in der Mitte einen angedrehten Rohrstutzen *N*. Auf diesen Rohrstutzen von 5 mm Wandstärke ist die dünne Gummimembran mit einem Ring *R* luftdicht aufgepreßt. Die andere Seite des Rohrstutzens geht dann in einen Schlauchansatz (in der Figur nicht

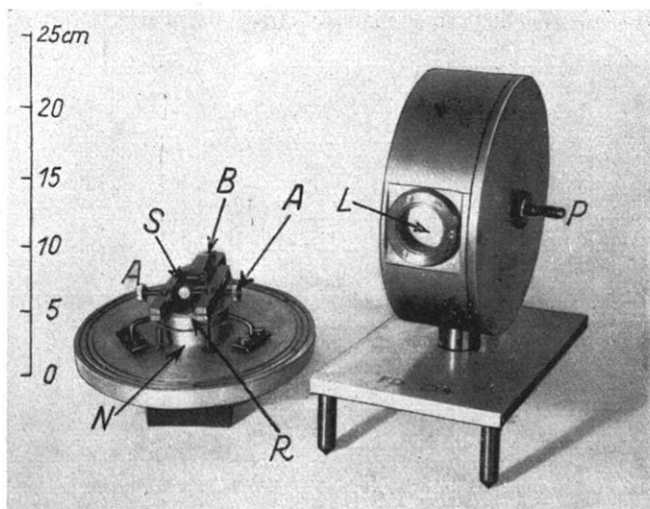


Fig. 2. Feindruckschreiber mit optischer Druckanzeige. Das Meßelement ist auf der links sichtbaren Grundplatte montiert, während rechts das dazugehörige Gehäuse steht. Die Grundplatte bildet im Meßzustand gleichzeitig die eine Seitenwand des Gehäuses

sichtbar) über. Der Membran gegenüber ist eine dünne Blattfeder *B* angebracht. Von dem Ende der Blattfeder bis zur Mitte der Membran ist ein — in der Figur nicht sichtbarer — dünner Kokonfaden gespannt, der einmal um die Spiegelachse mit dem Spiegel *S* geschlungen ist. Ein U-Stück trägt die Lager *AA* für die Spiegelachse. Es ist durch eine Feder gegen eine lange Stellschraube gepreßt. Die Stellschraube kann von außen gedreht und dadurch der Abstand der Spiegelachse von der Membran und die Nulllage des Lichtpunktes von außen her verstellt werden. Die Grundplatte wird zur Messung als Seitenwand auf das rechts sichtbare Gehäuse luftdicht aufgepaßt. Das Gehäuse zeigt vorn die Linse *L*, die das vom Spiegel reflektierte Licht in einen Registrierapparat projiziert. Das Gehäuse hat ferner einen Schlauchansatz *P*, durch den das Innere des Gehäuses mit der Außenluft in Verbindung steht. Die so völlig gleich gebauten Feindruckschreiber, die im

folgenden als FD 04 und FD 05 bezeichnet werden, wurden nun zur Schallmessung in folgender Aufstellung verwendet. Durch den offenen Schlauchansatz am Gehäuse des Apparates FD 04 wirkte der Schalldruck auf die Membran. An dem anderen Schlauchansatz war eine Thermosflasche von 2 Liter Inhalt luftdicht angeschlossen. Der Apparat FD 04 arbeitete also als Druckschreiber. Bei dem Apparat FD 05 war an den Schlauchansatz am Gehäuse eine kleine Glaskapillare als Ausgleichsdrüse angesetzt, während der Schalldruck durch den anderen Schlauchansatz unmittelbar auf die Membran wirkte. Der Apparat FD 05 arbeitet also als Luftdruckvariograph.

Die Fig. 3a und 3b zeigen die nach der von Dobberstein angegebenen Methode aufgenommenen Resonanzkurven der vier Apparate. Dabei sind auf der

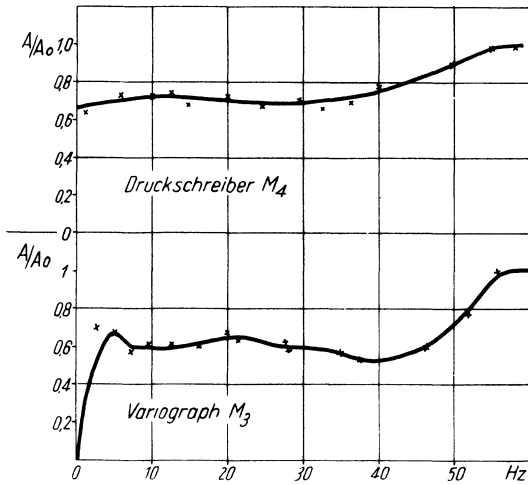


Fig. 3a.

Resonanzkurven des Variographen  $M_3$  und des Druckschreibers  $M_4$ . (Vgl. hierzu Dobberstein, l. c. S. 373.  $M_3$  und  $M_4$  entspricht dort Ausgleichskonus offen und geschlossen)

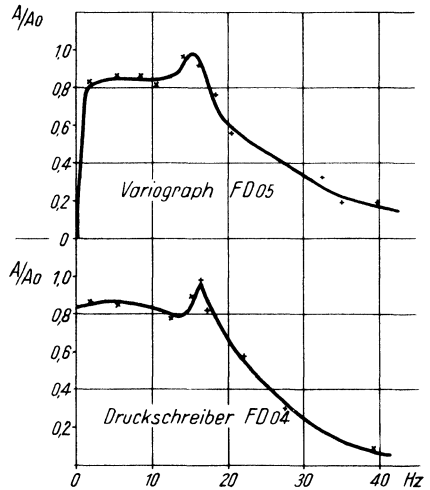


Fig. 3b.

Resonanzkurven des Variographen FD 05 und des Druckschreibers FD 04

Ordinaten die Amplituden in einem willkürlichen Maßstab, auf der Abszisse die verschiedenen Frequenzen aufgetragen. Die Fig. 3a zeigt die Resonanzkurven der Apparate  $M_3$  und  $M_4$ . Beide zeigen gemeinsam eine annähernd konstante Vergrößerung in dem Frequenzbereich von 4 bis 35 Hz. Nach größeren Frequenzen steigt die Empfindlichkeit dann noch um etwa 30%, da für beide Apparate die Eigenfrequenz bei etwa 70 Hz lag. Nur im untersten Frequenzbereich ist ein Unterschied vorhanden. Der als Druckschreiber arbeitende Apparat  $M_4$  zeigt bis zur Frequenz Null konstante Vergrößerung, während der Apparat  $M_3$  als Druckvariograph wegen der Ausgleichsöffnung von etwa 4 Hz an raschfallende Empfindlichkeit zeigt. Es wurde nicht versucht, die oberhalb 40 bis 50 liegende

Resonanzstelle zu beseitigen, da sie für die zu erwartenden Frequenzen von 2 bis 20 Hz als unerheblich angesehen werden konnte.

Die Fig. 3b zeigt die entsprechend aufgenommenen Resonanzkurven der Apparate FD 04 und FD 05. Beiden Kurven ist ein deutlich ausgeprägtes Resonanzmaximum bei 17 bzw. 15 Hz gemeinsam, das von der Eigenschwingung der in den Apparaten eingebauten Blattfeder herrührt. Nach höheren Frequenzen fällt die Empfindlichkeit beider Apparate rasch ab. Bis 20 Hz ist die Vergrößerung, abgesehen von dem kleinen Resonanzmaximum bei 17 bzw. 15 Hz, annähernd konstant. Da die Beseitigung des kleinen Resonanzmaximums technisch nur schwer möglich war, wurde auf seine Beseitigung verzichtet, um die für ganz andere Zwecke gebauten Druckschreiber nicht völlig umbauen zu müssen. Entsprechend den Kurven der Fig. 3a zeigt der als Luftdruckschreiber arbeitende Apparat FD 04 bis zur Frequenz Null konstante Vergrößerung, während die Empfindlichkeit des als Luftdruckvariographen arbeitenden Apparates FD 05 unterhalb 2 Hz sehr rasch abfällt.

Zum Schluß dieses Abschnittes seien die Konstanten der benutzten Apparate im Vergleich zu denen eines Kühlschen Undographen kurz zusammengestellt. Dabei ist als Empfindlichkeit der Druckschreiber die statische Empfindlichkeit angegeben. Für die Luftdruckvariographen ist die Empfindlichkeit bei 10 Hz für Apparat FD 05 und bei 25 Hz für Apparat M<sub>3</sub> angegeben. Die Angabe der Relaxationszeiten der beiden Luftdruckvariographen erfolgt schon hier aus Gründen der Übersichtlichkeit, auf ihre Gewinnung wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Tabelle 1. Zusammenstellung der Konstanten der benutzten Schallempfänger

Apparat	Ausschlag in mm bei einem Registrierabstand von 1 m bei einer Druckänderung von 1 · 10 <sup>-3</sup> mm Hg			Relaxationszeit in sec
M <sub>4</sub>	Druckschreiber	8.15 mm*)	} für 3—45 Hz	—
M <sub>3</sub>	Druckvariograph	24.7 „		0.04
FD 04	Druckschreiber	49.5 „	} für 2—18 Hz	—
FD 05	Druckvariograph	51.6 „		0.1
		10 „	für 3.5 Hz	—
	Undograph	28 20 „	für 8 Hz	0.03
		33 „	für 10 Hz	—

Die Grundformel der Wirkungsweise eines Luftdruckvariometers kann in folgender Form (siehe Dobberstein, S. 364, und Kleinschmidt, Handb. d. meteor. Instrumente, S. 329) geschrieben werden:

$$p' = \tau \left( \frac{dp}{dt} - \frac{dp'}{dt} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Dabei ist  $p$  der von außen auf den Apparat wirkende Luftdruck, also  $p = f(t)$  der äußere Luftdruckverlauf,  $p'$  der an der Membran tatsächlich angreifende

\*) Bei M<sub>4</sub> ist die Vergrößerung absichtlich herabgesetzt (siehe S. 262).

Druck\*) und  $\tau$  die Relaxationszeit des Variographen. Sie ist definiert als diejenige Zeit, in der bei einer plötzlichen Druckänderung  $dp$  während anschließend  $dp/dt = 0$  ist, der anfängliche Ausschlag  $dp'$  des Variographen auf den  $e$ -ten Teil abgesunken ist. Die Integration dieser Gleichung ergibt:

$$p = \frac{1}{\tau} \int_0^t p' dt + p' \dots \dots \dots (2)$$

wenn für  $t = 0$  auch  $p = 0$  gesetzt wird. Numerisch bzw. graphisch ist also ohne weiteres aus der aufgeschriebenen Kurve  $p' = f(t)$  eines Luftdruckvariographen der wahre Druckverlauf  $p = f(t)$  zu ermitteln. Um die Verhältnisse zwischen den Funktionen  $p = f(t)$  und  $p' = f(t)$  im großen klarer übersehen zu können, ist es zweckmäßig, zunächst einmal für periodische Schwankungen des äußeren Luftdrucks  $p = f(t) = p \cdot \sin \omega t$  zu setzen. Dann kann in der Gleichung (1)  $dp/dt$  durch  $p \cdot \omega \cos \omega \cdot t$  ersetzt werden, und damit wird:

$$\frac{dp'}{dt} + \frac{1}{\tau} p' = p \cdot \omega \cdot \cos \omega t.$$

Die Integration ergibt für stationäre Verhältnisse, also nach Abklingen der Einschwingvorgänge\*\*):

$$p' = \frac{p}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \cdot \tau^2}}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad \text{und} \quad \text{tg } \varphi = -\frac{1}{\omega \tau} \dots (3)$$

Der an der Membran tatsächlich angreifende Druck  $p'$  ist also gegenüber dem erregenden Druck  $p$  sowohl amplituden- wie phasenverzerrt. Wendet man nun die Gleichungen (1) bis (3) unmittelbar auf die gewonnenen Aufzeichnungen der Luftdruckvariographen an, so wird dabei vorausgesetzt, daß die Bewegungen der Membran die an sie angreifenden Drucke  $p'$  verzerrungsfrei wiedergeben. Das ist aber in Wirklichkeit nicht der Fall, da die Membran als schwingungsfähiges Gebilde eine erzwungene Schwingung stets amplituden- und phasenverzerrt. Die erste Verzerrung ist durch das Prinzip des Variographen gegeben und durch die Gleichung (1) formuliert. Die zahlenmäßige Ermittlung dieser Verzerrung einmal rechnerisch und einmal experimentell durch Vergleich der Aufzeichnungen eines Druckschreibers und eines Variographen, ist dann die Lösung der eingangs gestellten Aufgabe aus der Aufzeichnung eines Druckvariographen den wahren Druckverlauf zu ermitteln. Die zweite Verzerrung ist eine diesen Vergleich störende

\*)  $p'$  ist der Druckunterschied zwischen außen und innen:  $p' = p_{\text{außen}} - p_{\text{innen}}$ . Bei Dobberstein (l. c.) sind Ansatz und Rechnung eingehend dargestellt.

\*\*\*) Dobberstein hat diese Rechnung durchgeführt und kommt zu dem Schluß, daß die Dauer des Einschwingvorgangs von der Relaxationszeit der Membran in folgender Weise abhängt. Nach 0.1 bzw. 0.2 sec ist die Amplitude des Einschwingvorganges auf 10 % seines Anfangswertes abgesunken, wenn die entsprechenden Relaxationszeiten 0.04 bzw. 0.10 sec betragen.



Größe. Sie müßte zunächst rechnerisch eliminiert werden. Eine solche Eliminierung ist jedoch praktisch nur für periodische Schwankung des Außendruckes möglich. Wenn man jedoch die Auswertgenauigkeit der Variographenkurven betrachtet, so sind dabei Fehler von 10% in Phase und Amplitude kaum zu vermeiden. Es sei nun durch die zweite Verzerrung eine Amplituden- und Phasenverfälschung von je 10% zwischen den Bewegungen des Lichtpunktes und den an der Membran angreifenden Drucken als innerhalb der Meßgenauigkeit liegend zu vernachlässigen. Dann läßt sich aus den Resonanzkurven (Fig. 3a und 3b) berechnen, daß dies bei den Apparaten FD 04 und FD 05 für Frequenzen bis 9 Hz und bei den Apparaten M<sub>3</sub> und M<sub>4</sub> für Frequenzen bis 25 Hz der Fall ist. Im Rahmen dieser Fehlergrenzen ist also der vom Lichtpunkt aufgezeichnete Druckverlauf dem an der Membran angreifenden Druckverlauf gleich, und die Gleichungen (1) bis (3) sind ohne weiteres anwendbar. Beim Überschreiten der angegebenen Frequenzbereiche ist die zusätzliche Verzerrung dagegen zu berücksichtigen.

Bevor die Gleichungen (1) bis (3) nun praktisch geprüft werden können, ist die Messung der Relaxationszeiten der beiden Variographen FD 05 und M<sub>3</sub> durchzuführen. Die Relaxationszeiten sollten zwischen 0.02 und 0.1 sec liegen, da die sonst meist verwendeten Undographen Relaxationszeiten dieser Größenordnung besitzen. Wegen der Kleinheit der Relaxationszeiten erschien ihre Messung mit Hilfe der Definitionsleichung

$$\frac{d p'}{d t} = - \frac{1}{\tau} p'$$

zu unsicher.  $\tau$  wurde daher aus der nach Gleichung (3) auftretenden Phasenverschiebung bestimmt. Die Apparate wurden dazu in einem Zimmer des eingangs erwähnten Gauß-Hauses aufgestellt. Die Bewegungen der Lichtpunkte aller vier Apparate wurden in einem Lichtschreiber gleichzeitig aufgezeichnet. Durch gleichmäßiges hin- und herbewegen einer Tür wurden im Zimmer periodische Druckschwankungen erzeugt, deren Frequenz von 1.2 bis 5 Hz variiert werden konnte. In diesem Falle ist die Gleichung (3) für Apparat FD 04 und FD 05 bis auf 4%, für den Apparat M<sub>3</sub> und M<sub>4</sub> bis auf 1% gültig. Aus der Phasenverschiebung zwischen dem vom Apparat M<sub>4</sub> und FD 04 aufgezeichneten wahren Druckverlauf und dem von den Variographen FD 05 und M<sub>3</sub> aufgezeichneten Druckverlauf ergaben sich die Relaxationszeiten von 0.10 sec für Apparat FD 05 und 0.041 sec für Apparat M<sub>3</sub>. Durch eine zweite völlig andere Methode, auf die später eingegangen werden wird, wurde dieses Ergebnis bestätigt.

Um nun quantitative Vergleiche zwischen den Druckschreibern und den Variographen durchzuführen, wurde folgendermaßen vorgegangen. Zunächst wurden künstliche Druckschwankungen im Zimmer erzeugt, wobei alle Apparate die Aufstellung behielten, wie sie zur Bestimmung der Relaxationszeit gewählt war. Diese künstlich erzeugten Druckschwankungen wurden so gewählt, daß in beiden ersten Versuchen die Funktion  $p = f(t)$  — also in diesem Falle der Druck-

verlauf im Zimmer — möglichst einfach gebaut war. Im dritten Versuch wurde ein Druckverlauf hergestellt, der den Druckänderungen beim Eintreffen einer Schallwelle möglichst ähnlich war. Abschließend wurden dann einige Aufzeichnungen während der Fernschallsprengung miteinander verglichen.

Um eine möglichst einfach gebaute Funktion  $p = f(t)$  für den Druckverlauf im Zimmer zu erhalten, wurde im ersten Versuch die vorher geöffnete Haustür geschlossen, und im zweiten Versuch die vorher geschlossene Haustür geöffnet. Dabei stieg bzw. fiel durch die kurzzeitige Volumenverkleinerung bzw. -vergrößerung des Zimmers der Druck um einige Zehntel mm Hg in etwa 0.4 sec. Nach Schließen bzw. Öffnen der Tür glich sich der so entstandene Druckunterschied zwischen Zimmer und Außenluft in etwa 0.6 bis 0.8 sec wieder aus. Auf diese

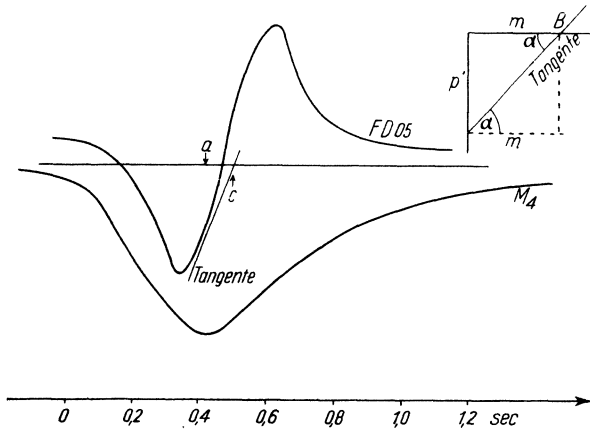


Fig. 4. Der Druckverlauf im Zimmer beim Öffnen einer Tür, aufgezeichnet durch einen Luftdruckvariographen (Apparat FD 05) und einen Luftdruckschreiber (Apparat  $M_4$ )

Weise wurde ein recht gleichmäßiger Druckanstieg und Abfall in einem Zeitraum von 1 bis 1.5 sec erzeugt. Die Fig. 4 zeigt die maßstabgetreue zeichnerische Vergrößerung der Aufzeichnungen der Apparate FD 05 und  $M_4$  beim Öffnen einer Tür. Der Apparat FD 04 wurde wegen seiner höheren Empfindlichkeit gesondert geprüft. Seine Aufzeichnungen waren unter Berücksichtigung der höheren Empfindlichkeit innerhalb der Fehlergrenzen mit den Aufzeichnungen des zweiten Luftdruckschreibers  $M_4$  identisch. Beide Figuren zeigen übereinstimmend: Der Apparat  $M_4$  zeichnet als Luftdruckschreiber den wahren Druckverlauf  $p$  als Funktion von  $t$  auf, und zwar entsprechend den gewählten Versuchsbedingungen eine „unsymmetrische Halbwellen“. Der Luftdruckvariograph FD 05 muß entsprechend der Gleichung (1)

$$p' = T \left( \frac{dp}{dt} - \frac{dp'}{dt} \right)$$

$p'$  als Funktion von  $t$  aufzeichnen. Aus der Fig. 4 geht hervor, daß  $dp'/dt$  und  $dp/dt$  — abgesehen dort, wo  $dp/dt$  sehr klein wird — gleiche Vorzeichen haben. Daher muß  $p'$  in erster Näherung der Steigung der Kurve  $p = f(t)$  proportional sein. Dementsprechend zeichnet der Variograph statt einer „Halbwelle“ eine volle Welle auf, jedoch fällt der Nulldurchgang dieser vollen Welle nicht mit dem Maximum bzw. Minimum der Halbwelle zusammen, sondern ist dagegen verspätet. Die Größe dieser Verspätung ist ein Maß für die Relaxationszeit des Variographen. Zur Zeit  $a$  (siehe Fig. 4) ist  $dp/dt = 0$ . Die für diesen Zeitpunkt an die Kurven  $p' = f(t)$  gelegte Tangente schneidet die Nulllinie im Punkte  $c$ . Die Strecke  $ac$  sei  $m$  genannt. Dann ist nach der Fig. 4

$$m = p' \cdot \frac{dt}{dp'}$$

da andererseits im Punkte  $a$

$$\tau = p' \frac{dt}{dp}$$

ist, folgt

$$m = \tau.$$

Die Abschnitte  $ab$  bzw.  $ac$  auf der Zeitachse stellen also unmittelbar die Relaxationszeiten der Variographen dar, und zwar ergibt sich aus den Kurven der Fig. 4 für Apparat FD 05 eine Relaxationszeit von  $\tau = 0.11$  sec. Ebenso ergab sich für den Apparat  $M_3$  eine Relaxationszeit von  $\tau = 0.05$  sec. Die Auswertung

Tabelle 2. Vergleich der gemessenen Maximal- und Minimalamplituden der Variographen FD 05 und  $M_3$  in mm Wassersäule mit den aus der Kurve  $p = f(t)$  des Druck-schreibers  $M_4$  berechneten Werten. Dabei sind zur Berechnung in der Gruppe I die Relaxationszeiten  $\tau = 0.11$  sec und  $\tau = 0.049$  sec, in Gruppe II die Relaxationszeiten  $\tau = 0.10$  sec und  $\tau = 0.040$  sec benutzt

Apparat	Wert	Messung	Berechnung I	Berechnung II
FD 05	Max	+ 6.3 · 10 <sup>-2</sup>	+ 6.1 · 10 <sup>-2</sup>	+ 5.5 · 10 <sup>-2</sup>
FD 05	Min	- 5.9 · 10 <sup>-2</sup>	- 7.0 · 10 <sup>-2</sup>	- 6.6 · 10 <sup>-2</sup>
$M_3$	Max	+ 2.7 · 10 <sup>-2</sup>	+ 2.6 · 10 <sup>-2</sup>	+ 2.3 · 10 <sup>-2</sup>
$M_3$	Min	- 3.5 · 10 <sup>-2</sup>	- 3.6 · 10 <sup>-2</sup>	- 3.1 · 10 <sup>-2</sup>

von 12 derartigen Versuchen ergab für die Relaxationszeiten im Mittel die Werte von 0.104 sec und 0,039. Die mittleren Fehler beider Werte betragen übereinstimmend  $\pm 0.01$  sec, die der einzelnen Messung dagegen  $\pm 0.03$  sec. Die verhältnismäßig sehr gute Übereinstimmung der aus der Fig. 4 berechneten Werte mit den aus der Phasenverschiebung bei periodischen Schwingungen zu 0.10 sec für FD 05 bzw. zu 0.041 sec für  $M_3$  bestimmten Werte ist daher zufällig.

Es wurden nun die Maximal- und Minimalamplituden der Variographenkurven der Fig. 4 ausgemessen und mit den aus der Gleichung (1) und dem wahren Druckverlauf zu berechnenden Amplituden verglichen. Da für diese Maximalamplituden  $dp'/dt = 0$  ist, wird aus Gleichung (1)

$$p' = \tau \frac{dp}{dt},$$

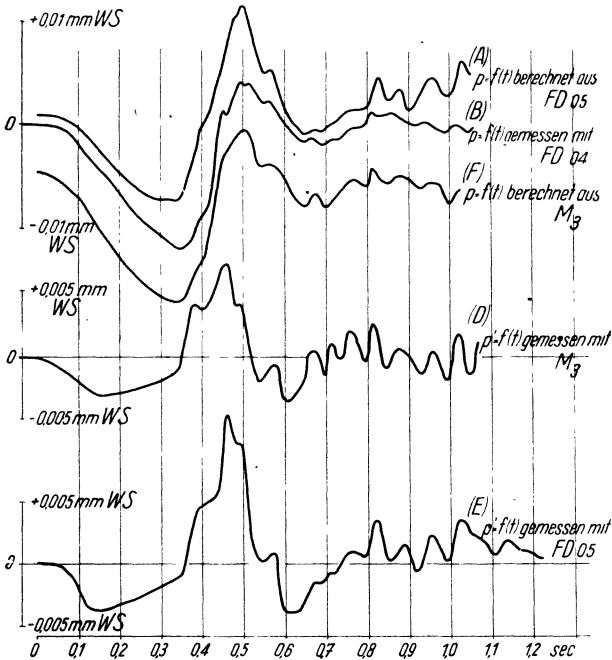


Fig. 5. Berechnung des wahren Druckverlaufs, erzeugt durch Bewegung einer Tür, aus den Aufzeichnungen zweier Variographen verschiedener Relaxationszeit. Kurve B stellt den von einem Druckschreiber aufgezeichneten wahren Druckverlauf, die Kurven D und E die von zwei Variographen aufgezeichneten Druckverläufe dar. Kurve A ist der aus der Variographenaufzeichnung Kurve E und Kurve F der aus der Variographenaufzeichnung Kurve D berechnete wahre Druckverlauf. Bei restlos einwandfreiem Arbeiten aller Apparate müßten also die Kurven A, B und F gleich sein. Ihre Abweichungen untereinander ergeben unmittelbar, wieweit aus Variographenkurven zutreffende Schlüsse auf den wahren Druckverlauf gezogen werden dürfen

$p'$  wurde nun einmal für die aus dem verspäteten Nulldurchgang der Variographenkurve bestimmten Relaxationszeiten und einmal für die aus der Phasenverschiebung bei periodischen Schwingungen berechnet. Das Ergebnis zeigt die Tabelle 2.

Die Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Amplituden liegen demnach bei  $\pm 10$  bis  $15\%$ . Diese Fehler sind wegen der Ablesegenauigkeit und dem großen Einfluß, den bereits kleine Fehler in der Bestimmung der Relaxationszeit haben (vgl. die Berechnung I und II!), unvermeidlich. Im Rahmen dieser Fehlergrenzen ist also die Übereinstimmung durchaus befriedigend.

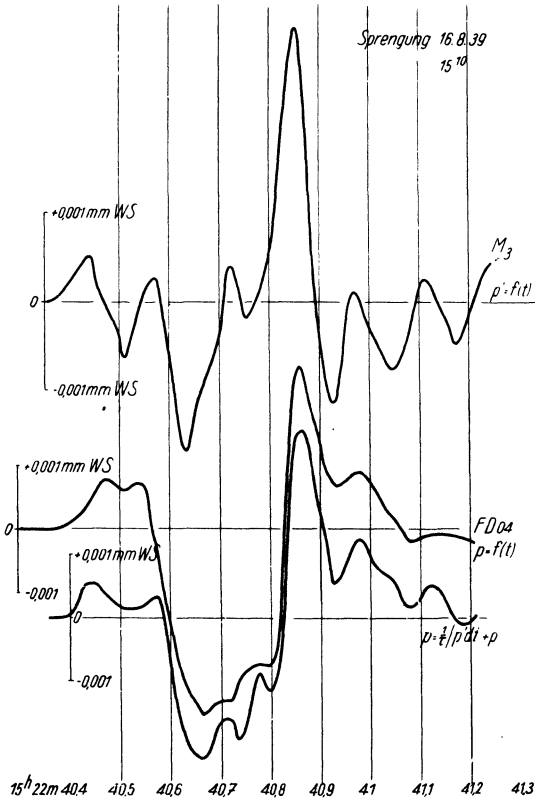


Fig. 6. Berechnung des wahren Druckverlaufs bei einer Sprengung in 215 km Entfernung aus der Aufzeichnung des Druckvariographen  $M_3$ .  $M_3$  Aufzeichnung des Druckvariographen;  $FD\ 04$  Aufzeichnung des Druckschreibers. Darunter die aus  $M_3$  berechnete Kurve des Druckverlaufs

Nach Abschluß dieser Versuche wurde nun eine Druckschwankung im Zimmer erzeugt, die den Druckverläufen in den Fernschallwellen möglichst ähnlich war. Aufgezeichnet wurde dieser Druckverlauf mit allen vier Apparaten in der gleichen Aufstellung wie bei den vorangegangenen Versuchen. Die Fig. 5 stellt die dabei gewonnenen Kurven für den Druckschreiber  $FD\ 04$  und die Vario-

graphen FD 05 und  $M_3$  dar. Die Aufzeichnungen des Druckschreibers  $M_4$  wurden nicht wiedergegeben, um die Figur nicht zu überlasten. Die Originalkurven wurden dabei so umgezeichnet, daß alle Kurven annähernd gleiche Empfindlichkeit erhielten. Die für die einzelnen Kurven gültigen Empfindlichkeiten sind links in der Zeichnung angegeben. Die Kurven  $B$ ,  $E$  und  $D$  sind die umgezeichneten registrierten Kurven. Dabei gibt die Kurve  $B$  den wahren Druckverlauf  $p = f(t)$  und die Kurven  $D$  und  $E$  den von zwei Variographen verschiedener Relaxationszeit aufgezeichneten Druckverlauf  $p' = f(t)$  wieder. Nach der Gleichung (2):

$$p = \frac{1}{\tau} \int_0^t p' dt + p'$$

wurden nun aus den Kurven  $D$  und  $E$  die entsprechenden Kurven des wahren Druckverlaufes berechnet. Dabei wurde als gleichmäßiges Zeitintervall

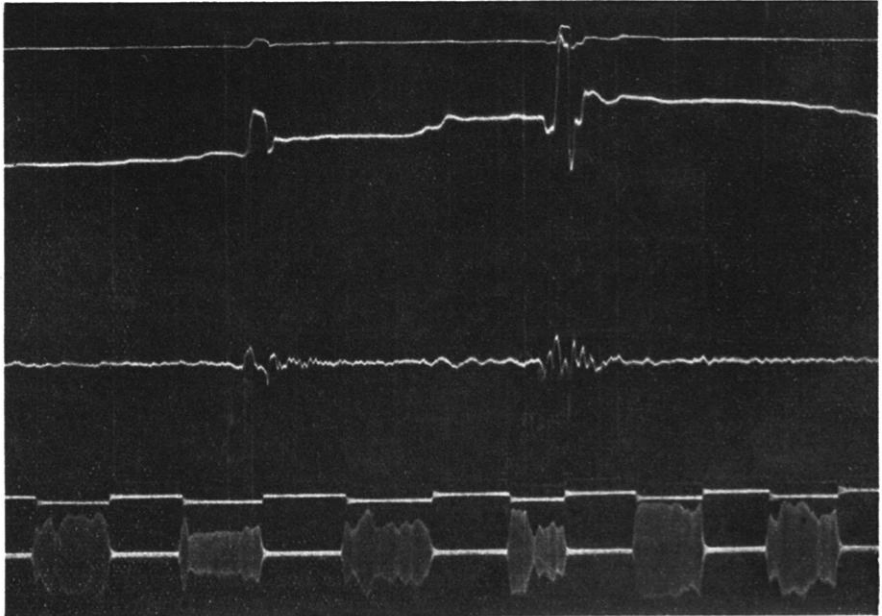


Fig. 7. Die Originalregistrierung zu Fig. 6

$dt = 0.025$  sec gewählt. Die Integration wurde graphisch durchgeführt. Das Ergebnis sind die ober- und unterhalb der Kurve  $B$  gezeichneten Kurven  $A$  und  $F$ , wobei die Kurve  $A$  aus der Aufzeichnung des Variographen FD 05 (Kurve  $D$ ) und die Kurve  $F$  aus den Aufzeichnungen des Variographen  $M_3$  (Kurve  $E$ ) berechnet wurde. Der Vergleich der Kurven  $A$ ,  $B$  und  $F$  zeigt, daß alle Apparate

den großzügigen Verlauf amplituden- und phasengleich wiedergeben. Nur in den Einzelheiten bestehen Unterschiede. Die nach dem Hauptmaximum auftretenden kleinen Wellen von etwa 20 Hz werden in den berechneten Kurven mit wesentlich größerer Amplitude wiedergegeben als in der Originalkurve des Druckverlaufes (Kurve *B*). Ebenso ist das Hauptmaximum in der Kurve *A* zu groß. Ein Blick auf die Variographenkurven zeigt, daß in diesen beiden Gebieten für die Apparate FD 05 und FD 04 schon eine Verzerrung durch die ungünstige Form ihrer Resonanzkurven erfolgt.

Die Fig. 6 zeigt nun eine entsprechende Darstellung für den Druckverlauf bei einer der Schallsprengungen. Während dieser Sprengungen war der Apparat  $M_4$ , FD 04 und  $M_3$  im Gauß-Haus, der Apparat FD 05 im Turm des Geophysikalischen Institutes aufgestellt. Die beiden Druckschreiber und der eine Variograph registrierten dabei im Gauß-Haus auf einem 15 cm breiten Film. Die Originalregistrierung zeigt Fig. 7. Auf sie wird später eingegangen. In der Fig. 6 ist der im Gauß-Haus aufgezeichnete Druckverlauf des Druckschreibers FD 04 und des Variographen  $M_3$  in wesentlich größerem Maßstab wiedergegeben. Aus der Variographenkurve wurde dann der wahre Druckverlauf berechnet und in der Fig. 6 unmittelbar unter die Aufzeichnung des Druckschreibers FD 04 eingezeichnet. Obwohl gerade in diesem Falle der Unterschied der Aufzeichnungen des Variographen und des Druckschreibers besonders groß ist, stimmt die berechnete Kurve überraschend gut mit der registrierten Kurve des wahren Druckverlaufes überein.

Eine weitere Vermehrung solcher Berechnungsbeispiele würde nichts Neues bringen. Es läßt sich wohl zusammenfassend sagen: Aus den Aufzeichnungen eines Luftdruckvariographen lassen sich mit einer Annäherung von 10 bis 20% die Kurven des wahren Druckverlaufes bestimmen. Dazu ist eine sehr genaue Kenntnis der Relaxationszeit des Variographen notwendig. Über die experimentelle Bestimmung der Relaxationszeit ist auf S. 269 ausführlich eingegangen. Die durch Resonanzerscheinungen der Membran des Schallempfängers auftretenden Verzerrungen sind gegenüber der obenerwähnten Meßgenauigkeit meist zu vernachlässigen.

Göttingen, Geophysikalisches Institut.

---

### G. A. Suckstorff †

Beim Feindflug am 28. August 1940 erlitt den Fliegertod der Dozent der Meteorologie Dr. phil. habil. Gustav Adolf Suckstorff, geb. 6. April 1909 in Hannover. Suckstorff studierte von 1928 bis 1933 Physik, Chemie und Mathematik, zuerst in Tübingen, dann in Berlin, wo er mit einer Arbeit über Höhen-