

## Werk

**Titel:** Bodenschwingungen sinusförmiger Erregung

**Autor:** Angenheister, G.

**Jahr:** 1937

**PURL:** [https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?251726223\\_1937\\_0018|log6](https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?251726223_1937_0018|log6)

## Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)  
SUB Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen

✉ [info@digizeitschriften.de](mailto:info@digizeitschriften.de)

## Bodenschwingungen sinusförmiger Erregung.

Von

G. Angenheister.

Bei der Ausbreitung elastischer Energie in einem geschichteten Medium wird man alle bekannten *Erscheinungen der Wellenausbreitung* erwarten können: Die Ausbildung von longitudinalen und transversalen Raumwellen, von freien Eigenschwingungen, von Oberflächenwellen (Querschwingungen und Rayleighwellen), die mit Phasen- oder Gruppengeschwindigkeit laufen, ferner von Reflexion, Brechung, Beugung, Dispersion, Interferenz, Schwebung und Dämpfung. Was sich wirklich ausbildet, hängt einmal von dem Anregungsvorgang (ob Stoß oder Schwingungserregung) ab und von der Schichtung des Untergrundes, ferner von dem Betrag der ausgesandten Energie und ihrer Dämpfung.

Das Ziel der *praktischen Verwendung* seismischer Methoden ist, aus einem oder mehreren der angeführten Vorgänge 1. die *Materialkonstanten* der einzelnen Schichten des Untergrundes (vor allem Geschwindigkeit, zuweilen auch Dämpfung), ferner 2. die Lage der Grenzflächen, *Tiefe, Einfallen und Streichen der Schichten* zu ermitteln. Daraus lassen sich — besonders wenn eine geologische Deutung hinzukommt — die Strukturelemente des Untergrundes, Art und Ausdehnung der Gesteine ableiten. Welcher der oben angeführten physikalischen Vorgänge zur Lösung dieser Aufgabe benutzt wird, hängt ab von der jedesmal besonderen Fragestellung, den besonderen Untergrundverhältnissen und von der Energie, die verfügbar ist.

Die Aufgaben lassen sich am einfachsten einteilen nach der Dicke der untersuchten Schichtung und nach der Art der verfügbaren Anregung.

Die Dicke der durchstrahlten Schichten beträgt Hunderte von Kilometern, wenn so große Energiemengen wie beim Erdbebenstoß zur Verfügung stehen. Fragen des Aufbaues der Erde und der *Großtektonik* sind durch Beobachtung solcher Energiestrahlung untersucht worden, z. B. der Aufbau der Kontinente und Meeresböden, die Tiefenerstreckung der Alpenfaltung, die Lage der nördlichen Vorsenke (Kohlegürtel) des Varistikums.

Bei den viel geringeren Energiemengen eines Sprengstoßes dringen die elastischen Wellen nur Hunderte von Metern oder wenige Kilometer in die Tiefe. Hier sind es Fragen des *Bergbaues*, die geklärt werden können, z. B. Lage und Ausdehnung nutzbarer Lagerstätten von Salz (Öl), Erz, Kohle oder der geologischen Schichten, in denen sie eingebettet sind.

Für *bautechnische Fragen* genügt die Kenntnis der Struktur des Untergrundes bis zur Tiefe weniger Zehner von Metern. Hier kommt man mit noch geringeren Energiemengen zum Ziel, sodaß eine Anregung durch eine Schwingmaschine ausreicht. Die harmonische Form dieser Anregung besitzt außerdem gewisse Vorteile gegenüber der stoßförmigen. Das praktische Ziel der Untersuchung ist hier die Bestimmung der *Tragfähigkeit und Schwingfähigkeit des Baugrundes*, der zulässigen statischen und dynamischen Belastung.

#### **Ausbreitung der Raumwellen bei Erdbeben und Sprengstößen.**

Durch WIECHERT und seine Mitarbeiter wurde im Geophysikalischen Institut in Göttingen zunächst die Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler Raumwellen mit der Tiefe gemessen, sodann die Brechung und Reflexion derselben an der Grenze zweier Schichten. Daraus folgte die Tiefe dieser Grenzflächen, an denen man einen Materialwechsel annehmen muß, z. B. den Übergang vom Silikatmantel zum Metallkern in 2900 km Tiefe in der Erde.

Die Beobachtungen an Erdbebenwellen haben eine bestimmte grundsätzliche Bedeutung für das Studium der Ausbreitung elastischer Energie. Die Erdbebenwellen liefern ein Experiment mit gewaltigen Kräften, Massen und Entfernungen und daher mit großen Amplituden, Laufzeiten und Schwingungsdauern. Dies erleichtert die Untersuchungen, und manche Eigenschaften dieser Ausbreitung wurden zuerst an Erdbebenwellen erkannt.

*Refraktionsmethode.* L. MINTROP, ein Schüler WIECHERTS, hat als erster die seismische Methode für den Aufschluß geologischer Schichten entwickelt und im Bergbau verwendet. Mit Hilfe systematisch angelegter Sprengungen konnte er künstliche Erdbebenwellen (Sprengwellen) erzeugen und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit messen. Im geschichteten Untergrund treten dabei an der Grenzfläche Brechungen und Reflexionen der Sprengwellen auf. Ist die Geschwindigkeit in der unteren Schicht größer, so läuft in ihr die gebrochene Welle unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion an der Schichtgrenze entlang und überträgt dabei die Bewegung

wieder fortlaufend auf die obere Schicht. Aus den Laufzeiten der direkten und gebrochenen Wellen kann die Lage der Schichten und ihre Dicke errechnet werden (*Refraktionsmethode*). Damit ist eine Methode von praktischer Bedeutung für den Bergbau gegeben. Im Geophysikalischen Institut fand diese Methode weiteren Ausbau durch WIECHERT, ferner von 1929—36 durch BROCKAMP, KORTE, BLUT, GERECKE, MÜLLER, KÖHLER, BUNGERS.

*Echomethode.* Auch die Laufzeiten der reflektierten Wellen werden im Bergbau zu Aufschlüssen verwendet, zu Echolotungen im festen Untergrund (*Reflexionsmethode*). Als beste Reflexionsfläche erwies sich der sprunghafte Schichtwechsel zwischen Eis und Fels. Daher wurde diese Methode vom Geophysikalischen Institut auf Gletschern eingehend geprüft und gleichzeitig zu Eisdickenmessungen in den Alpen und auf dem Inlandeis in Grönland benutzt (MOTHES, BROCKAMP, WÖLCKEN, GERECKE und MÜLLER 1927/33).

*Richtwinkelmethode.* Beide bisher genannten Methoden beruhen lediglich auf Laufzeitmessungen. Zur Ausführung genügt ein empfindlicher Seismograph (am besten ein Vertikalseismograph) und eine Apparatur zur Übertragung des Sprengmomentes. Seit 1931 wurde im Geophysikalischen Institut bei Sprengungen außer der Laufzeit auch die Form der Bodenbewegung in Amplitude und Periode in 3 Komponenten getrennt aufgezeichnet und zu Aufschlüssen über die Schichtung des Untergrundes verwendet. Hierzu mußten sorgfältig gedämpfte und von jeder unerwünschten Eigenschwingung (z. B. der einzelner Übertragungsteile) befreite Erschütterungsmesser gebaut werden. Zur Prüfung solcher Erschütterungsmesser wurden besondere Schütteltische für horizontale und vertikale Bewegung konstruiert (Abb. 1).

Aus den Amplituden dieser seismischen Aufnahmen von Sprengungen in 3 Komponenten läßt sich die Stoßrichtung (Azimut- und Auftauchwinkel) des reflektierten und gebrochenen Strahles bestimmen. Daraus folgt die Lage des Spiegelungspunktes und die Tiefe und Lage der reflektierenden Grenzfläche. Damit befassen sich besonders die Arbeiten von MÜLLER 1932 und 1935, BUNGERS 1935 und KAMEL und FALTAS 1936. Es gelang durch eine rechnerische und durch eine zeichnerische Methode, aus den gemessenen Richtwinkeln die Lage (Streichen und Einfallen) der reflektierenden oder brechenden Schicht im Untergrund zu bestimmen.

Auch über die physikalische Natur der Wellen, ob longitudinal, transversal, Rayleighwelle, Schichtschwingung, geben die Drei-Komponenten-Aufzeichnungen Aufschluß (Abb. 2).

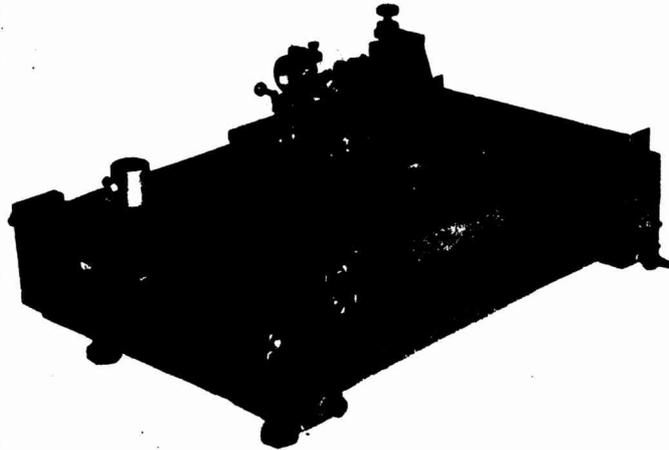
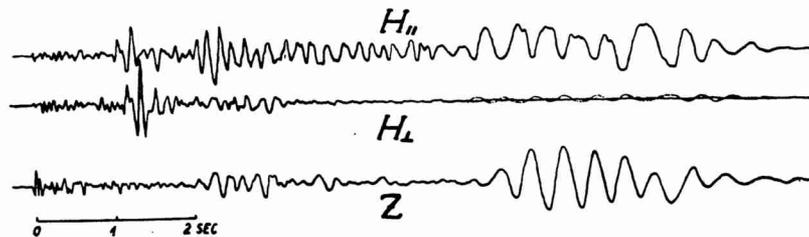


Abb. 1. Schütteltisch des Geophysikalischen Institutes Göttingen für Horizontalbewegung mit Horizontalerschütterungsmesser. (Nach ANGENHEISTER<sup>11)</sup>.)



*Sprengung Nieder-Olfleiden, 8.6.32.*

*$\Delta = 5,8 \text{ km. Ladung} = 750 \text{ kg.}$*

Abb. 2. Bodenbewegung bei einer Sprengung, aufgenommen in 3 Komponenten. Vorne Schichtwellen zwischen 1 und 2 sec ohne Bewegung in Z; am Ende RAYLEIGH-Wellen ohne Bewegung in  $H_{\perp}$ . (Nach MÜLLER<sup>1)</sup>.)

|| bedeutet parallel,  $\perp$  senkrecht zur Richtung zur Sprengstelle.

#### **Ausbreitung der Oberflächenwellen bei Erdbeben und Sprengungen.**

Die bisher beschriebenen Aufschlußmethoden benutzen lediglich die Laufzeiten und Amplituden der longitudinalen Raumwellen von stoßförmiger Anregung, elastische Stöße. Die Aufzeichnungen der Erdbeben enthalten außer diesen Stößen auch zuweilen nahe sinusförmige Schwingungen, Rayleighwellen, die elliptisch in der Einfallsebene und Querwellen (Schichtschwingungen), die senkrecht dazu schwingen. Beide zeigen im geschichteten Untergrund der Erde eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Wellenlänge, Dispersion. Die kurzen Wellenlängen — klein gegen die Dicke

der oberen Schicht — laufen nur in dieser mit der Geschwindigkeit, die dieser Schicht zukommt. Die langen Wellen greifen tiefer und schreiten fort mit der Geschwindigkeit der tieferen Schicht. Aus der Form der Dispersionskurve läßt sich die Dicke der oberen Schicht ableiten. Diese Methode wurde von uns benutzt, um die Struktur der Ozeanböden und Kontinente, der Gebirgsstöcke (Alpen, Himalaya) und Flachländer zu bestimmen (ROHRBACH 1932, VON ZUR MÜHLEN 1934).

Bei Sprengungen treten neben Stößen sinusförmige Schwingungen auf, die zuweilen Dispersion, zuweilen Schwebungen und Interferenzen zeigen. Beim Anlaufen von Maschinen gerät der Boden von Göttingen in Resonanz (KÖHLER 1932). Es liegt nahe anzunehmen, daß einzelne Schichten fähig sind, Eigenschwingungen auszusenden, und daß diese Frequenzen in den verschiedenen Schichten mit unterschiedlicher Geschwindigkeit laufen.

Es erschien daher zweckmäßig, außer der Stoßerregung bei Sprengungen auch rein sinusförmige Erregung des Untergrundes durch schwingende Maschinen vorzunehmen und diese Bodenschwingungen systematisch zu untersuchen.

Diese Versuche mit Schwingmaschinen haben schon jetzt einige Resultate ergeben, die für das physikalische Verständnis der Ausbreitung elastischer kohärenter Wellenzüge in geschichteten Medien wichtig sind. Außerdem ergab sich eine praktische Anwendung dieser neuen seismischen Methode. Im folgenden soll eine zusammenhängende Darstellung des augenblicklichen Standes dieser Untersuchungen gegeben werden, aus der auch die Richtlinien für ihre Weiterentwicklung folgen.

#### **Ausbreitung sinusförmig erregter Bodenschwingungen (Schwingmaschinenwellen).**

*Methode.* Diese neue Methode wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem Geophysikalischen Institut in Göttingen und der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik an der Technischen Hochschule Berlin entwickelt. Auch hier werden Geschwindigkeiten gemessen. Auf inhomogenem Untergrund ergibt sich dabei eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Frequenz (Dispersion). Außerdem treten bei besonderen Versuchsanordnungen Interferenzen und Schwebungen auf, die einen Schluß auf die Schichtung des Untergrundes ermöglichen. Dadurch gewinnt auch dies Verfahren Bedeutung für Fragen des Bergbaues und der Bautechnik. Insbesondere zeigt sich eine empirische Beziehung

zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit und dem Höchstwert der zulässigen Bodenpressung. Dem Boden werden bei diesem Verfahren durch eine Schwingmaschine (Sender) periodische Kräfte aufgezwungen, sodaß er in sinusförmige Schwingungen gerät. Diese Bodenschwingungen werden von elektrischen Seismographen (Empfänger) aufgenommen und mittels Galvanometer auf ein Registriergerät optisch übertragen und photographisch aufgezeichnet. Der Sender steht im allgemeinen ortsfest. Die Empfänger werden von Station zu Station versetzt, wenn nötig in kleinen Abständen von nur einem Meter. Der Sender sendet eine bestimmte Frequenz, die stufenförmig oder kontinuierlich geändert werden kann.

*Instrumente. Schwinger.* Als Sender wurde eine Schwingmaschine nach Angaben der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik von der Firma LOSENHAUSEN, Düsseldorf, gebaut unter Anlehnung an eine Schwingmaschine, die diese Firma für Brückenprüfungen der Deutschen Reichseisenbahn geliefert hat.

Zwei gegenläufig rotierende Wellen liegen parallel zueinander. Sie tragen zwei exzentrische Schwungmassen. In jedem Augenblick heben sich die wagerechten Komponenten der Schwungskräfte auf. Die Summe der lotrechten Komponenten durchläuft sinusförmig alle Werte zwischen einem abwärts und aufwärts gerichteten Höchstwert. Die periodischen Kräfte wachsen mit dem Quadrat der Umdrehungszahl der Maschine. Der Abstand der exzentrischen Schwungmassen (30 kg) von der Wellenachse kann von 0 bis 7 cm verändert werden, und dementsprechend wächst auch die Fliehkraft. Die Frequenz der Maschine kann von 3 bis 65 Hertz gesteigert werden. Die größte zulässige Fliehkraft beträgt 2000 kg. Der Antrieb des Schwingers geschieht durch einen Motor. Auf dem Schwinger ist ein Vibrograph (nach GEIGER) aufgeschraubt. Er schreibt die Lotrechtkomponente der dort herrschenden Schwingungsausschläge auf. Es sind im allgemeinen rein sinusförmige Kurven. Bei einer bestimmten Phase jeder Umdrehung der Maschine wird durch Induktion ein Stromstoß in ein Kabel gesandt und auf ein Relais übertragen und zusammen mit den Bodenschwingungen aufgezeichnet.

*Seismographen.* Als Empfänger wurden sehr starre, leicht transportable Erschütterungsmesser im Geophysikalischen Institut in Göttingen gebaut. Ihre stationäre Masse, ein Hufeisendauermagnet, bewegt sich gegen einen festen, mit der Grundplatte starr verbundenen Anker. Dieser Anker bildet den Eisenkern einer Induktionsspule. Durch die Bewegung gegen den Anker werden Induktionsströme in der Spule erzeugt und durch ein Kabel auf

ein ortsfestes Drehspulgalvanometer übertragen. Die Instrumente konnten in wenigen Sekunden aufgestellt werden. Der Abstand von einer Station zur nächsten betrug ein oder wenige Meter. So konnten bis 60 Stationen pro Stunde vermessen werden. Diese Seismographen mußten auf Schütteltischen für horizontale und vertikale Bewegung sehr sorgfältig geeicht werden.

*Ausbreitung.* Die Geschwindigkeit der durch den Schwinger erzeugten Bodenschwingungen beträgt meist nur wenige Hunderte von Metern pro Sekunde, sodaß diese kaum Longitudinalwellen sein können. Die Amplituden der direkten, gebrochenen und reflektierten Wellenzüge überlagern sich in den Beobachtungspunkten an der Erdoberfläche. Die Ermittlung der Schwingungsebene der Teil-

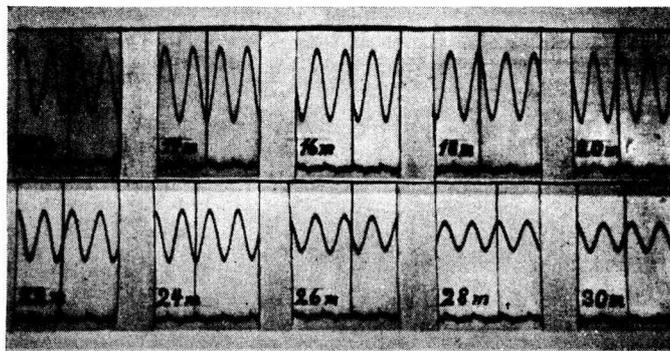


Abb. 3. Phasenverschiebung zwischen den Schwingungen der Maschine und des Bodens in verschiedenen Entfernungen von der Maschine. (Nach KÖHLER®.)

wellen ist daher schwierig. Eindeutige Schlüsse aus der Lage der Schwingungsebene auf die physikalische Natur dieser Wellen bleibt einstweilen noch unsicher.

Das Verhalten der Wellen, ihre Dispersion, Reflexion, Brechung, Interferenz und Schwebung ist vom besonderen Charakter der Welle (ob longitudinale, transversale) bis zu einem bestimmten Grade unabhängig und kann daher soweit auch ohne Kenntnis des Wellencharakters hier beschrieben werden (A. RAMSPECK, R. KÖHLER, G. A. SCHULZE, R. BUNGERS 1934/37).

*Direkte Wellen im homogenen Untergrund.* In einschichtigem, homogenem Boden ist eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Frequenz nicht vorhanden, in mehrschichtigem Boden tritt die Abhängigkeit (Dispersion) zuweilen sehr deutlich hervor. Abb. 3 zeigt oben die seismographische Aufnahme einer sinusförmigen

Bodenschwingung von der Frequenz  $n = 15$  Hz in 12 bis 30 m Entfernung vom Sender (Schwingmaschine) auf homogenem Untergrund. Darunter sind auf Abb. 3 die elektrisch übermittelten Zeitmarken aufgezeichnet, die die Schwingmaschine bei jeder Umdrehung aussendet. Bei 14 m und 24 m fällt die Zeitmarke mit dem Minimum der Bodenschwingung zusammen. Die Geschwindigkeit

$$v = (24 - 14)15 = 150 \text{ m/sec.}$$

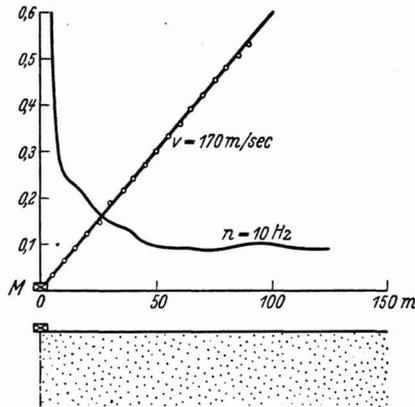


Abb. 4. Ordinate: Laufzeit  $t$  in Sekunden, gleichzeitig Amplituden  $A$  in relativem Maß. Abszisse:  $\Delta$  Entfernung in Meter. (Nach RAMSPECK<sup>10</sup>.)

Abb. 4 zeigt eine Laufzeitgerade für  $v = 170$  m/sec, außerdem die Amplitude als Funktion der Entfernung, beides für  $n = 10$  Hz.

*Direkte Wellen im geschichteten Untergrund. Dispersion.* Der Sender sendet nacheinander verschiedene Frequenzen  $n_1, n_2, n_3, \dots$ . Die zugehörigen Geschwindigkeiten seien  $v_1, v_2, v_3, \dots$ . In Abb. 5 ist  $v$  als Funktion von  $n$  dargestellt. Die kleinste Geschwindigkeit  $v = 150$  m/sec gehört zur obersten, die größte 1150 m/sec zur tieferen Schicht. Bei Annahme paralleler Grenzflächen der obersten Schicht läßt sich ihre Dicke  $d$  aus dem Verlauf dieser Dispersionskurve zu ungefähr 10 m schätzen.

*Reflexionen.* Der Untergrund sei zweischichtig, die Schichtgrenze parallel zur Erdoberfläche. Der Sender sende mit konstanter Frequenz. An der Oberfläche treffen dann in der Entfernung  $s$  vom Sender zwei sinusförmige Wellenzüge konstanter Amplituden ein, ein direkter und ein an der Grenzfläche reflektierter. Beide überlagern sich, sie haben dieselbe Frequenz, aber für die Entfernung  $s$  im allgemeinen

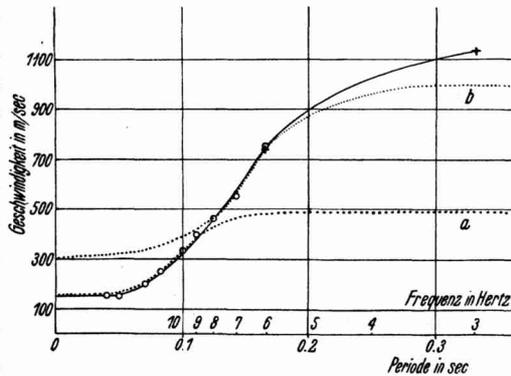


Abb. 5. Dispersionskurve auf geschichtetem Untergrund bei Göttingen. o mit Schwingmaschine, + mit Reichsbahnmaschine angeregt. — beobachtet, --- berechnet. (Nach G. A. SCHULZE<sup>9</sup>.)

eine bestimmte konstante Phasendifferenz. Die resultierende Welle ist eine Sinuswelle konstanter Maximalamplitude, deren Wert von der Phasendifferenz abhängt. In einem benachbarten Ort  $s_1$  ist die Phasendifferenz und damit die Maximalamplitude der resultierenden Welle eine andere. Längs eines Profils durch den Sender schwankt daher die Maximalamplitude der resultierenden Welle, sie zeigt Maxima und Minima. Es treten Interferenzen auf. Im Maximum ist die Phasendifferenz gleich Null und der Wegunterschied (Differenz der Länge des direkten und reflektierten Strahls)

$$\sqrt{s^2 + 4d^2} - s = r\lambda = r\frac{v}{n} \dots \text{I,}$$

worin  $r$  eine ganze Zahl und  $\lambda$  die Wellenlänge bedeutet. Dies gilt für den Fall, daß an der Reflexionsstelle ein Phasensprung nicht auftritt.

In der Entfernung  $s'$  (wobei  $s' > s$ ) liege das nächste Maximum der Amplitude. Dann ist

$$\sqrt{s'^2 + 4d^2} - s' = (r-1)\lambda = (r-1)\frac{v}{n} \dots \text{II.}$$

Ist  $v$  in der vorher angegebenen Weise bestimmt und ferner  $s$ ,  $s'$  und  $n$  bekannt, so läßt sich die Dicke  $d$  der Schicht aus I und II berechnen. Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Maxima ist größer als  $\lambda$  (da  $s' > s$ ), und wächst mit wachsendem  $s$ , was geometrisch leicht einzusehen ist. Für  $s \rightarrow \infty$  wird der direkte ( $s$ ) und reflektierte ( $\sqrt{s^2 + 4d^2}$ ) Strahl gleich lang.

*Brechung.* In der Oberfläche überlagern sich der durch die obere Schicht gelaufene direkte und der durch die untere Schicht gelaufene gebrochene Wellenzug. Die Geschwindigkeiten in der oberen und unteren Schicht seien  $v$  und  $v'$ , die Laufzeiten der direkten und gebrochenen Wellen  $t$  und  $t'$ . Nimmt man zur Vereinfachung einen senkrechten Durchgang durch die obere Schicht an, so gilt bekanntlich  $\Delta t = t - t' = s\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v'}\right) - 2\frac{d}{v}$ , worin  $d$  die Dicke der oberen Schicht bedeutet.

*Interferenzen.* Sendet der Sender mit konstanter Frequenz, so tritt als resultierende Welle an jedem beliebigen festen Orte eine reine Sinusschwingung konstanter Amplitude auf, deren Wert durch die Phasendifferenz der direkten und gebrochenen Welle bestimmt wird. Längs eines Profils durch den Sender treten Interferenzen auf. Doch ist der Abstand zweier Interferenzmaxima nicht wie bei den Reflexionen eine Funktion des Abstandes vom Sender, sondern konstant.

Abb. 6 zeigt die Maximalamplitude der resultierenden Welle als Funktion  $s$  des Abstandes vom Sender. Der Abstand benachbarter Interferenzmaxima beträgt für  $n = 18 \text{ Hz}$  etwa 20 m. Die Höhe der Interferenzmaxima nimmt wegen der Absorption der Energie mit wachsendem  $s$  ungefähr als Exponentialfunktion ab.

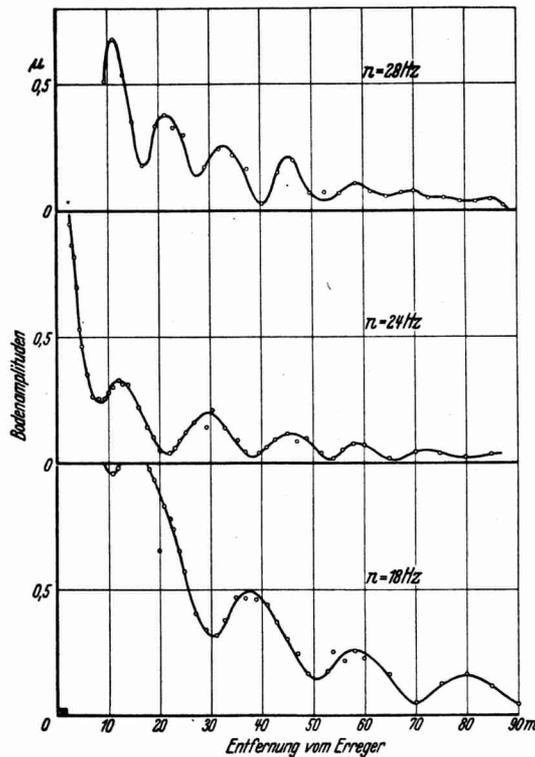


Abb. 6. Bodenamplituden, angeregt durch Schwinger als Funktion der Entfernung vom Schwinger bei konstanter Frequenz. Aufgenommen für  $n = 18, 24, 28$ . (Nach RAMSPECK<sup>6)</sup>.)

*Schwebungen.* Sendet der Sender nacheinander, stufenförmig, verschiedene Frequenzen, so treten an einem festen Ort  $s$  Schwebungen der Maximalamplitude auf. Abb. 7 zeigt diese Schwebungen der Maximalamplitude als Funktion der Frequenz für verschiedene feste Orte  $s$ . Zwei aufeinanderfolgende Schwebungsmaxima sollen eintreten bei den Frequenzen  $n_1$  und  $n_2$ , dann ist

$$\Delta t = t - t' = r_1 T_1 = (r_1 + 1) T_2 = \frac{r_1}{n_1} = \frac{r_1 + 1}{n_2} \quad \text{und} \quad r_1 = \frac{n_1}{n_2 - n_1}$$

$$\text{und} \quad \Delta t = \frac{1}{n_2 - n_1} = s \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v'} \right) - 2 \frac{d}{v}$$

Aus dem Strahlengang für zwei benachbarte Interferenzmaxima im Orte  $s_1$  und  $s_2$  folgt, wenn  $s_2 > s_1$ :

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 = (s_2 - s_1) \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v'} \right).$$

Es sei nun  $v < v'$ ,

für  $s_1$  ist dann  $\Delta t_1 = r_1 T$ ,  
worin  $r$  eine ganze Zahl  
und  $T = \frac{1}{n}$  ist,

für  $s_2$  ist

$$\Delta t_2 = r_2 T = (r_1 + 1) T,$$

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 = T = \frac{1}{n}$$

$$= \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v'} \right) (s_2 - s_1)$$

$$\text{oder} \quad \frac{1}{v} - \frac{1}{v'} = n(s_2 - s_1) = \text{konst.}$$

Dies ist, wie Abb. 6 zeigt, sehr nahe erfüllt.

Ist unbekannt, ob  $v \geq v'$ , so läßt sich dies auf folgendem Wege entscheiden. Man trägt  $\Delta t = t - t' = \frac{1}{n_2 - n_1}$  als Funktion von  $s$  auf. Durch Extrapolation findet man das zu  $\Delta t = 0$  gehörige  $s_0$  des Schnittpunktes der Laufzeitgraden des direkten und gebrochenen Strahles (oder ihrer Rückwärtsverlängerung). Für  $s_0$  positiv ist  $v < v'$ , für  $s_0$  negativ  $v > v'$ .

Ist  $v$  bekannt, so läßt sich  $v'$  und  $d$  aus der Kombination der Interferenz und Schwebungsmessung berechnen.

*Scheingeschwindigkeiten.*

Bei der Messung von  $v$  oder  $v'$  ist man darauf angewiesen, das Fortschreiten einer bestimmten Phase der kombinierten Welle im Gelände zu verfolgen, z. B. der Phase  $\varphi = 0$ . Wir wollen zunächst die Absorption vernachlässigen. Die Rechnung zeigt nun, daß bei Interferenzen  $v = \frac{dx}{d\varphi}$  im

allgemeinen nicht konstant und  $\varphi(x)$  im allgemeinen keine Gerade ist. Die Messung zeigt (Abb. 8), daß die Laufzeitkurve

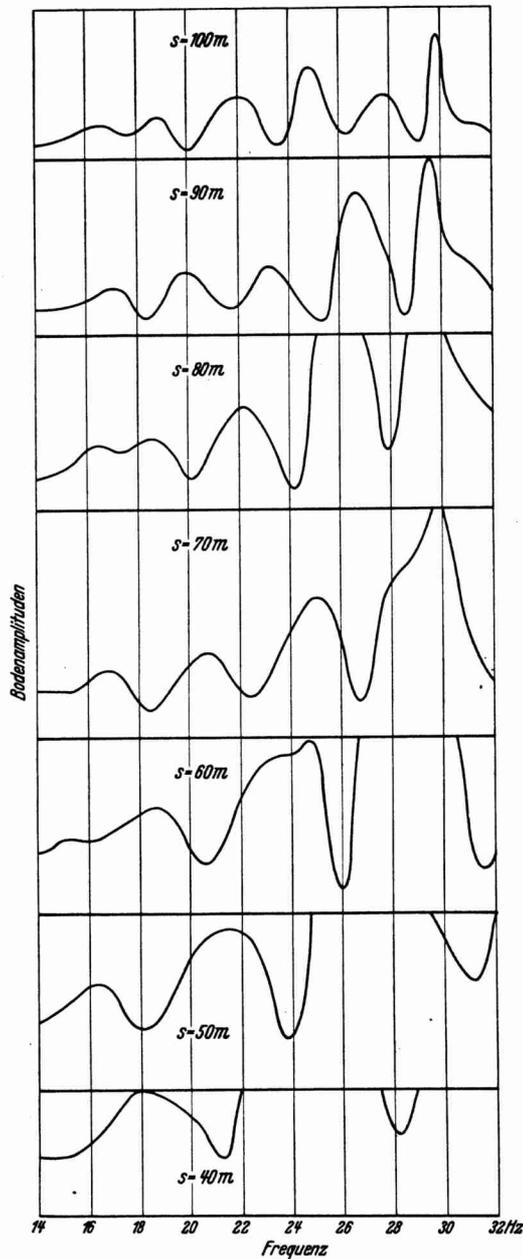
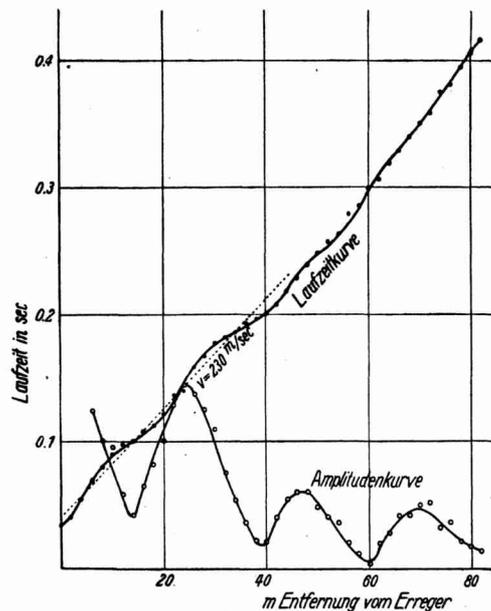


Abb. 7. Bodenamplituden, angeregt durch Schwinger als Funktion der Frequenz, aufgenommen in verschiedenen Entfernungen vom Schwinger. (Nach RAMSPECK<sup>6</sup>.)

sich um eine mittlere Gerade herumschlängelt und eine Reihe von

Wendepunkten besitzt. Die rechnerische Bestimmung der Lage der Wendepunkte durch Differentiation der Schwingungsgleichung für Interferenzen ergibt, daß diese dort liegen, wo die Amplitude der Überlagerungsschwingung ein Maximum oder Minimum erreicht. Die Scheingeschwindigkeit interferierender Wellen ist am größten beim Interferenzmaximum, wenn die Teilwelle mit der größeren Amplitude die kleinere Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt; dagegen beim Interferenzminimum, wenn die Teilwelle mit der größeren Amplitude die größere Geschwindigkeit besitzt. Auch dies bestätigt die Messung (Abb. 8).



Hieraus läßt sich gleichfalls entscheiden, ob  $v \leq v'$ . Man hat hier also Scheingeschwindigkeiten wechselnden Betrages und mittlere durchschnittliche Geschwindigkeit zu unterscheiden. Die letztere richtet sich nach der Teilwelle größerer Amplitude. Sind die Amplitudenunterschiede der beiden Teilwellen (der direkten und gebrochenen) sehr groß, so ist wohl unmittelbar einzusehen, daß die Form und Lage der Extremwerte der resultierenden Welle von der größeren Amplitude beherrscht wird, und die durchschnittliche Geschwindigkeit zu dieser Teilwelle gehört.

Abb. 8. Laufzeit- und Amplitudenkurve für  $n = 20/\text{sec}$ . Größte Scheingeschwindigkeit über dem Amplitudenminimum. (Nach RAMSPECK<sup>10</sup>.)

Sind beide Teilwellen gleich stark exponentiell gedämpft, so ändert sich dadurch nichts am oben ermittelten Verhalten der Teil- und durchschnittlichen Geschwindigkeit. Ist die Dämpfung aber in der oberen und unteren Schicht sehr verschieden, so kann in kleiner Entfernung vom Sender z. B. die Teilwelle der oberen Schicht (die direkte), in größerer Entfernung aber umgekehrt die Teilwelle der unteren Schicht (die gebrochene) überwiegen und dadurch Form und Lage der Maxima der resultierenden Welle bestimmen. Die durchschnittliche Geschwindigkeit entspricht dann in der Nähe des Senders der Geschwindigkeit der oberen, in größerer Entfernung der Ge-

schwindigkeit der unteren Schicht. Die Laufzeitgerade zeigt einen Knick in der Entfernung, in der die Amplitude der unteren Welle zu überwiegen beginnt (Abb. 9). Die Laufzeiten liefern also  $v$  und  $v'$  getrennt, die Interferenzen geben als Kontrolle  $\frac{1}{v} - \frac{1}{v'} = n(s_2 - s_1)$ .

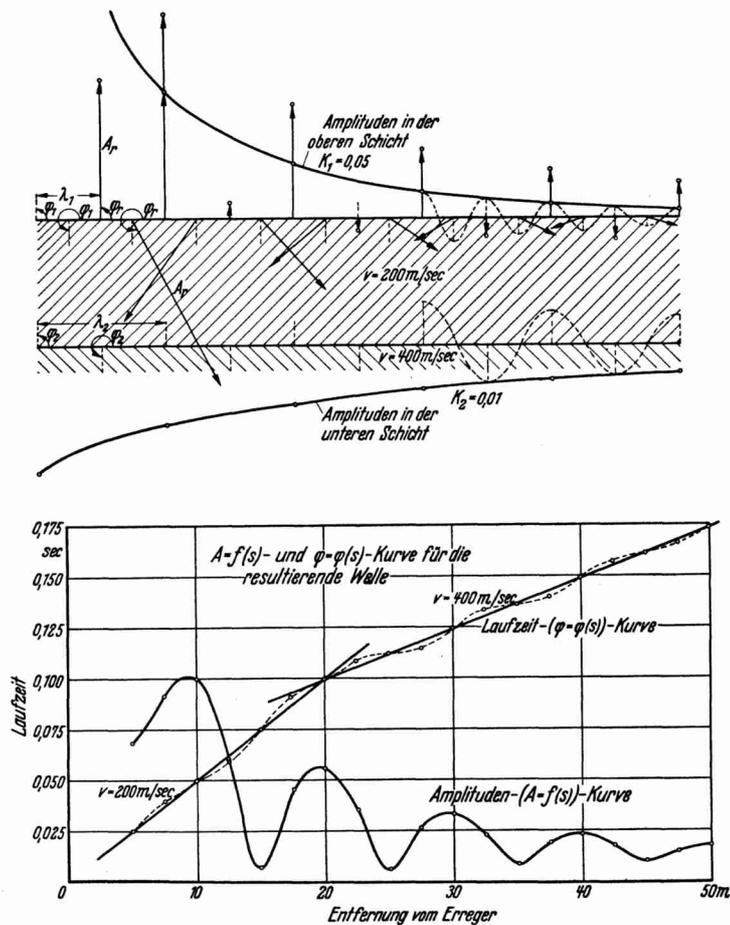


Abb. 9. Schematische Darstellung zur Interferenz zweier Einzelwellen von gleicher Frequenz, aber verschiedener Weg- und Wellenlänge und verschieden starker Absorption. (Nach RAMSPECK<sup>6)</sup>.)

Oben:  $\lambda_{1,2} =$  Wellenlängen } der Einzelwellen.  
 $\varphi_{1,2} =$  Phasen }  
 Unten: Resultierende Welle und geknickte Laufzeitkurve.

*Nichtstationäre Bodenschwingungen im zweischichtigen Untergrund.*  
 Bisher sandte der Sender für die Zeit einer Messung eine konstante Frequenz. Während der Messung trafen am Empfänger zwei Wellenzüge der-

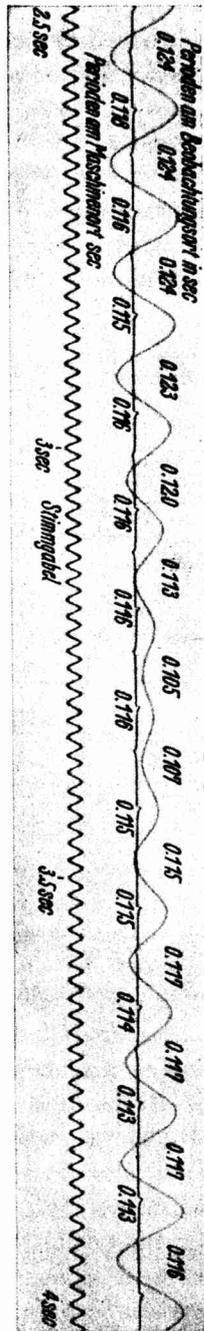


Abb. 10. Registrierung eines Schwebungsintervalles (2:1 verkl.), vgl. Abb. 11 2.5 bis 4 sec.  
Die gerade Linie mit Zeitmarken ist die Aufzeichnung der Periode am Maschinenort, die zugeschriebenen Zahlen bedeuten die einzelnen Periodenlängen in sec. Die Schwebungskurve entspricht der Bodenbewegung am Beobachtungsort. Stimmgabel 50 Hertz.  
(Nach SCHULZE 9.)

selben Frequenz ein. Beim Anlaufen der Maschine steigt die Sendefrequenz kontinuierlich. Am Empfänger treffen dann zwei Frequenzen  $n_1$  und  $n_2$  gleichzeitig ein, die den anlaufenden Sender nacheinander verlassen haben.  $n_1$  sei als direkte Welle mit der Laufzeit  $t_1$  durch die obere Schicht gelaufen,  $n_2$  mit  $t_2$  durch die untere. Die Differenz  $t_1 - t_2$  ist gleich der Zeit, in der an der anlaufenden Maschine die Sendefrequenz von  $n_1$  auf  $n_2$  steigt. Diese Zeit kann an der Maschine (am Vibrograph) abgelesen werden. Am Empfänger überlagern sich die beiden verschiedenen Frequenzen  $n_1$  und  $n_2$  (jede von beiden nimmt beim weiter dauernden Anlaufen der Maschine für sich zu, beide jedoch annähernd gleichförmig). Durch ihre Überlagerungen entstehen am ortsfesten Empfänger Schwebungen, deren Schwebungsintervall  $t_s = \frac{1}{n_2 - n_1}$ . Da die Maschine mit wachsender Zeit auf höhere Touren kommt, so sinkt die Periode der resultierenden Welle mit der Zeit, jedoch nicht kontinuierlich.

Abb. 10 und 11 zeigen die Änderung der Periode und Amplitude auf einem zweischichtigen Untergrund während des Anlaufens der Sendemaschine. Die Periode sinkt im Minimum der Schwebung sprunghaft. Das bedeutet nach der Theorie, daß die größere Frequenz auch die höhere Amplitude besitzt. Dann ist die Zahl der resultierenden Wellen im Schwebungsintervall gleich der Zahl der Schwingungen mit höherer Frequenz, die in diesem Intervall erfolgen. Da  $t_s$  gemessen

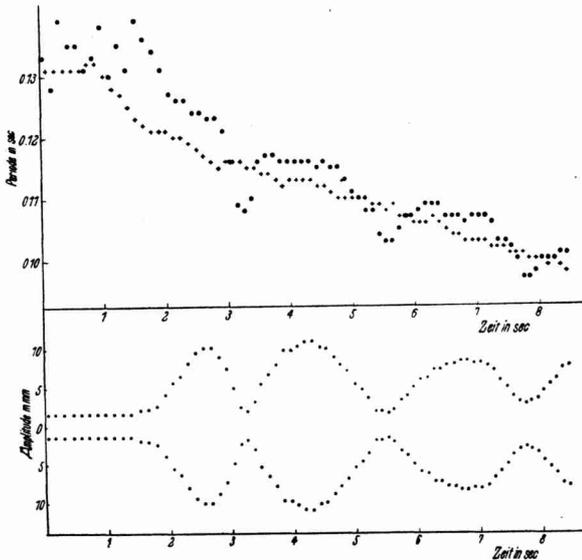
wird, folgt jetzt  $n_1$  und  $n_2$  gesondert und damit die Zeit  $t_1 - t_2 = \Delta t$ ,

in der die Maschine das Frequenzintervall  $n_2 - n_1$  durchläuft. Aus Messungen in verschiedenen Abständen erhält man  $\Delta t$  als Funktion von  $s$ . Ist ferner  $v$  bekannt, so folgt graphisch die Laufzeitkurve für  $v'$  und die Schichtdicke  $d$ .

Abb. 11. Periodenzeitkurve und Amplitudenzeitkurve für eine Messung beim Anlaufen der Maschine auf zweifach geschichtetem Untergrund. (Nach SCHULZE<sup>9</sup>.)

- + + + Periode der Maschine (Sender).
- • • Periode der Bodenbewegung am Beobachtungsort.
- • • Amplituden am Beobachtungsort.

Einen Ausschnitt der Messung 2.5 bis 4.0 sec gibt Abb. 10 wieder.



**Anwendung.**

*Ausbreitung sinusförmiger Wellen bei Erdbeben und Sprengungen.*

In den Aufzeichnungen von Erdbeben und Sprengungen treten, wie oben erwähnt wurde, sinusförmige Schwingungen nahe konstanter Frequenz auf, zuweilen mit ausgesprochenen Schwebungen, deren endgültige Erklärung bisher aussteht. Um dies Verhalten des Untergrundes zu untersuchen, wurde derselbe Boden erst durch einen Sprengstoß dann durch die Schwingmaschine angeregt. Abb. 12 zeigt, daß beim Sprengstoß eine sehr schwach gedämpfte Frequenz von 11,8 Hz auftrat. Die Anregung mit der Schwingmaschine ergab im Frequenzbereich 8—14 Hz ein

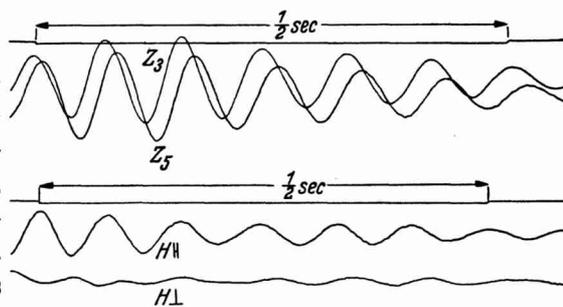


Abb. 12. Freie Eigenschwingung des Untergrundes angeregt durch Sprengung in 160 m Entfernung. Eigenfrequenz und Dämpfung des Bodens 11,8 Hz und 1,12:1. Für die Erschütterungsmesser  $Z_5$ ,  $H_{11}$ ,  $H_1$  ist  $n_0 = 5$  Hz und  $\alpha = 1$ , für  $Z_3$  ist  $n_0 = 14$  Hz  $\alpha \sim 1$ . (Nach KÖHLER<sup>9</sup>.)

Abb. 12 zeigt, daß beim Sprengstoß eine sehr schwach gedämpfte Frequenz von 11,8 Hz auftrat. Die Anregung mit der Schwingmaschine ergab im Frequenzbereich 8—14 Hz ein

ausgesprochenes Maximum bei 11,5 Hz und zwar liegt dasselbe in verschiedenen Abständen von der Maschine stets bei derselben Frequenz (Abb. 13). Es ist dies also kein Schwebungsmaximum, sondern das Resonanzmaximum einer freien Eigenschwingung des Bodens, einer freien Schichtschwingung, die sowohl durch Sprengstoß wie durch Schwingmaschine angeregt werden kann.

Bei verschiedenen Sprengungen konnte nun nachgewiesen werden, daß die Periodenlänge freier sinusförmiger Schwingungen

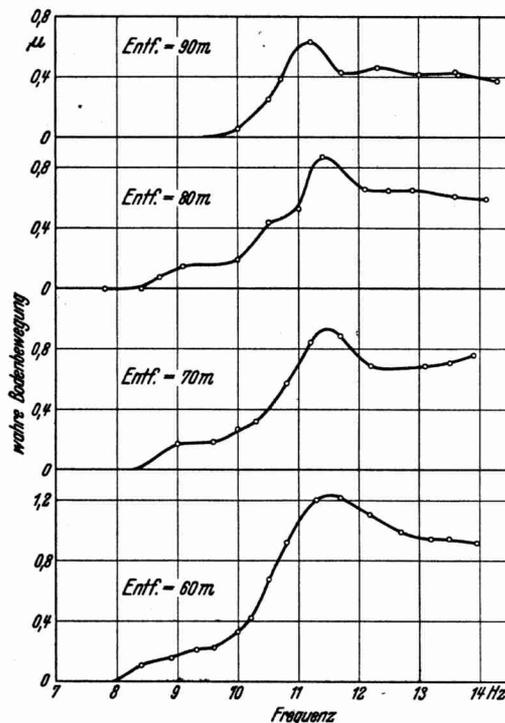


Abb. 13. Resonanzmaximum desselben Bodens wie in Abb. 12, angeregt durch die Schwingmaschine in verschiedenen Entfernungen. Eigenfrequenz des Bodens bei 11,5 Hz. (Nach KÖHLER<sup>6)</sup>.)

breitet sich aus in der oberen und unteren Schicht mit den diesen Schichten zukommenden Geschwindigkeiten. Wir verfolgen eine dieser beiden Frequenzen. Ist die Geschwindigkeit in der unteren Schicht größer, so eilt sie dort vor und überträgt dabei fortlaufend ihre Bewegung auf die obere Schicht (analog dem Geschoßknall). In einer entfernteren Station an der Oberfläche werden sich daher die beiden in der oberen und unteren Schicht gelaufenen Wellenzüge überlagern. Der schnellere schiebt sich dabei durch den lang-

genau den Laufzeiten entspricht, die eine longitudinale Druckwelle oder eine transversale Scherwelle benötigt, um den Abstand von der Sprengstelle an der Oberfläche bis zu der darunter liegenden Schichtgrenze hin und zurück zu durchlaufen, also den Laufzeiten des Echos.

Das recht verwickelte und mannigfaltige Bild der Sprengaufzeichnungen wird hierdurch durchsichtiger. Die Sprengstelle sendet schwach gedämpfte Schwingungen mit den beiden Frequenzen, die den Laufzeiten der longitudinalen und transversalen Echowelle in der obersten Schicht entsprechen. Jede dieser Schwingungen

sameren hindurch. Wir haben dieselben Verhältnisse wie bei Maschinenschwingungen, nur daß hier vom Sender (Bodenecho an der Sprengstelle) eine begrenzte Anzahl leicht gedämpfter Wellen ausgeht. Interferenzen längs eines Profils sind zu erwarten. Da zwei, oftmals infolge mehrfacher Schichtung noch weitere Sendefrequenzen auftreten, müssen auch Schwebungen an einem festen Ort beobachtet werden. In großer Entfernung von der Sprengstelle haben sich die begrenzten, verschieden schnell laufenden Wellenzüge wieder getrennt und treten einzeln nacheinander auf. Alle diese Einzelheiten werden durch Spreng- und Erdbebendiagramme bestätigt. Die quantitative Auswertung kann zu Aufschlüssen über den Untergrund verwandt werden. In dieser Richtung liegen die Ziele weiterer Arbeiten.

*Untersuchung des Baugrundes.* Zwischen der Geschwindigkeit der hier beschriebenen Bodenschwingungen und dem Höchstwert der für Bauwerke „zulässigen Bodenpressung“ besteht nach A. RAMSPECK die in der Tabelle angegebene empirische Beziehung. Die „zulässige Bodenpressung“ ist die Belastung in  $\text{kg/cm}^2$ , bei der sich erfahrungsgemäß ein Bauwerk auf dem betreffenden Boden nicht mehr als bis zu einer zugelassenen Grenze setzt.

Bodenart	Geschwindigkeit für $n = 20$ bis $25$ Hz $v$ in m/sec	Zulässige Boden- pressung $B$ in $\text{kg/cm}^2$
Moor	80	0
Mehlsand	110	1
Mittelsand	150	2
Lehmiger Sand	170	2,5
Geschiebemergel	190	3
Mergel	220	4
Kies in 4 m Tiefe	320	4,5
Dichter Grobkies	420	4,5
Keupersandstein	650	—
Buntsandstein	1100	—

Die Geschwindigkeit  $v$  gibt ebenso wie die maximale zulässige Bodenpressung eine Maßzahl für die Eignung des Bodens als Baugrund. Der Wert von  $v$  kann für die Berechnung von Fundamenten zu Maschinengründungen, Brückenpfeilern, Eisenbahndämmen und Betondecken der Autostraßen verwendet werden. Die zulässige Bodenpressung mußte bisher nach einzelnen Bohrproben im Laboratorium beurteilt werden. Die Geschwindigkeit  $v$  dagegen stellt

immer einen Mittelwert dar für die betreffende Bodenschicht in ihrer natürlichen Lagerung, unter den vorhandenen Druck- und Grundwasserhältnissen.

Bei künstlicher Verbesserung des Baugrundes durch Einstampfen, Zusammenrütteln oder Einfügen von Rammpfählen kann  $v$  vor- und nachher gemessen werden. Die Änderung von  $v$  ist dann ein Maß für die erreichte Verbesserung. So wurde vor der Verbesserung  $v = 150$  m/sec, nach der Verdichtung durch eingerammte Pfähle 320 m/sec gemessen. Die zulässige Bodenpressung stieg dadurch also von 2 auf 4,5 kg/cm<sup>2</sup>.

#### Literatur.

##### *Richtwinkelmethode:*

- 1) H. K. MÜLLER, Zeitschr. f. Geophysik, 1932, S. 65, 1935, S. 111.
- 2) R. BUNGERS, Zeitschr. f. Geophysik, 1935, S. 326, 207.
- 3) M. KAMEL und F. FALTAS, Zeitschr. f. Geophysik, 1936, S. 383.

##### *Dispersion der Oberflächenwellen:*

- 4) W. ROHRBACH, Zeitschr. f. Geophysik, 1932, S. 113.
- 5) W. VON ZUR MÜHLEN, Zeitschr. f. Geophysik, 1934, S. 26.

##### *Maschinenschwingungen:*

- 6) Die Anwendung dynamischer Baugrunduntersuchungen. Mitteilungen über gemeinsame Arbeiten der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik und des Geophysikalischen Institutes in Göttingen. Veröffentlichung des Institutes der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik an der Technischen Hochschule Berlin. Heft 4, Verlag J. SPRINGER, Berlin, 1936 (R. KÖHLER und A. RAMSPECK). Als seism. Untersuchungen d. Geophysikal. Inst. Göttingen, Nr. XXIV.
  - 7) R. BUNGERS, Theorie der Schwebungen. Seism. Untersuchungen d. Geophysikal. Inst. Göttingen, Nr. XXV. Zeitschr. f. Geophysik, 1936, S. 229.
  - 8) R. KÖHLER, Beitrag zur Deutung der verschiedenen Wellengruppen im Seismogramm von Sprengungen. Seism. Untersuchungen d. Geophysikal. Inst. Göttingen, Nr. XXVIII. Nachr. d. Ges. d. Wissenschaften zu Göttingen, 1936, S. 145.
  - 9) G. A. SCHULZE, Über die Ausbreitung sinusförmiger Bodenbewegung. Seism. Untersuchungen d. Geophysikal. Inst. Göttingen, Nr. XIX. Zeitschr. f. Geophysik, 1935, S. 307.
    - Das elastische Verhalten des Bodens bei sinusförmiger Anregung. Zeitschr. f. Geophysik, 1936, S. 350. Ferner Zeitschr. f. Geophysik, 1937, S. 119.
  - 10) A. RAMSPECK, Wendepunkte in der Laufzeitkurve sinusförmiger Wellen. Zeitschr. f. Geophysik, 1937, S. 1.
  - 11) G. ANGENHEISTER, Bodenschwingungen. Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften 1936.
-