

Werk

Jahr: 1932

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:8

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X 0008

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X 0008

LOG Id: LOG_0005

LOG Titel: Untersuchung der Schallausbreitung bei Unterwasserexplosionen

LOG Typ: article

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.

from the Goettingen State- and University Library.
Each copy of any part of this document must contain there 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

Untersuchung der Schallausbreitung bei Unterwasserexplosionen

Von W. Beuermann - (Mit 13 Abbildungen)

Die Arbeit behandelt in der Ostsee angestellte Versuche zur Bestimmung der Laufzeitkurve von Unterwasserknallen. Die vom Empfänger aufgezeichneten Knallkurven werden insbesondere auf ihren Frequenzinhalt hin diskutiert. Die Deutung eines Teiles als Gasblasenschwingungen wird durch Laboratoriumsversuche erhärtet.

Zweck der Arbeit. Die Unterwasserschalltechnik bedient sich seit Jahren für orientierende Versuche über die Schallausbreitung im Wasser kleiner Sprengladungen, die man unter Wasser explodieren läßt. Diese Unterwasserknalle stellen eine einfache und doch kräftige Schallquelle dar, besonders, wenn man berücksichtigt, mit welchen Schwierigkeiten es verbunden ist, mit elektromechanischen Schallquellen große Schallenergien abzustrahlen. Diesen Vorteilen, die sie auch viel bei Echolotverfahren zur Anwendung kommen ließen, steht die Vermutung gegenüber, daß die plötzlich auftretenden großen Drucke eine anormale Schallausbreitung verursachen könnten. Abgesehen von der Überschallgeschwindigkeit. die in der nächsten Umgebung der Explosionen auftritt*), sprachen für diese Annahme auch Oszillogramme, die bei einem Abstand von 2000 m eine Art Vorläufer zeigten, die bei Entfernungen von wenigen hundert Metern nicht bemerkt wurden. Man neigte zu der Ansicht, daß die Vorläufer auf Schallwellen zurückzuführen seien, die in Schichten mit höherer Fortpflanzungsgeschwindigkeit unter dem Meeresboden verlaufen. Ähnliche Erscheinungen wurden bei künstlichen Erdbeben mittels Sprengungen auf dem Festlande beobachtet, die zur Erforschung des Erdinneren ausgeführt wurden. Die hierbei auftretenden Vorläufer sind als Wellen erkannt worden, die eine Erdschicht mit größerer Schallgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger durchlaufen**).

Eingehende Versuche in dieser Richtung sind für Wasser bisher nicht gemacht worden.

Im Jahre 1883 haben zwei Engländer***) bei Sidney die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles bei Unterwasserexplosionen in Abhängigkeit von der Ladung gemessen. Die Ergebnisse ihrer Versuche, die sie über eine Entfernung von 200 Yards anstellten, überschreiten die als normal anzusehenden Geschwindigkeiten um 15 bis 30%.

^{*)} Ramsauer: Ann. d. Phys. 73, 265 (1923).

^{**)} Handb. d. Experimentalphysik XXV, Teil 3, S. 277—289.

^{***)} Threlfall und Adair: Proc. Roy. Soc. London (A) 45, 450; 46, 496.

Die Aufgabe dieser Arbeit bestand darin, zu untersuchen, ob bei Unterwasserexplosionen mit kleiner Ladung die auftretenden Vorläufer eine höhere Geschwindigkeit haben und dementsprechend die Laufzeitkurve eine ähnliche Form besitzt, wie sie aus der Seismik her bekannt ist, oder ob für das Auftreten der Vorläufer eine andere Erklärung zu finden ist. Gleichzeitig sollte bestimmt werden, welche Schallgeschwindigkeit für die praktischen Meßmethoden, Knallortsbestimmung usw. bei den Rechnungen anzusetzen ist. Drittens sollte versucht werden, eine Begründung für die auftretenden Frequenzen, die die Oszillogramme bei den aufgenommenen Knallkurven stets zeigen, zu finden, insbesondere, ob die bei der Explosion auftretende Gasblase solche Schwingungen ausführt, oder ob sie sekundärer Natur sind.

Apparatur. Die zur Durchführung dieser Versuche notwendige Apparatur bestand aus zwei Teilen:

- 1. der Einrichtung zur Aussendung und zum Empfang des Unterwasserschalles und
- 2. der Hilfsapparate, die der Übertragung der Zeitmarke dienten. Die für die Versuche als Schallquelle benutzten Sprengmittel waren meist 2 g Glühzünder der Westfälisch-Anhaltischen-Sprengstoff A. G., in wenigen Fällen wurden auch solche von 6 und 50 g verwendet. Die Ladung war in dünnen Zinkblechhülsen

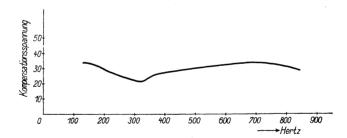


Fig. 1. Frequenzkurve des Verstärkers mit Empfänger Nr. 1027

untergebracht und, mit Anschlußdrähten versehen, gebrauchsfertig erhältlich. Zur Zündung benötigten sie 0.5 Amp., die einer Akkumulatorenbatterie von 4 oder 6 Volt entnommen wurde. Zur Aufnahme des Schalles wurde ein elektrodynamischer Unterwasserschallempfänger verwendet, dessen Membran etwa 0.2 mm stark und durch Zusatzgewichte auf eine Eigenperiode von 56.5 Hertz gebracht war. Zur Magnetisierung benötigte er etwa 100 Watt, die eine Akkumulatorenbatterie lieferte.

Zur Aufzeichnung der Schallkurven wurden die Wechselströme des Empfängers entweder direkt über einen Transformator oder unter Vorschaltung eines Röhrenverstärkers einer Oszillographenschleife zugeführt. Anfangs wurde ein Spezialoszillograph für große Filmgeschwindigkeiten verwendet, später ein Siemens-

Oszillograph mit drei Schleifen. Zur Ausmessung der Oszillogramme wurde durch eine zweite Schleife die 500 Periodenkurve eines Tongenerators aufgezeichnet, dessen Frequenz vor jeder Aufnahme mit einer geeichten Stimmgabel kontrolliert wurde.

Um von der Güte der Empfangsapparatur, besonders ihrer Frequenzabhängigkeit, ein Bild zu bekommen, wurde die Frequenzkurve des Verstärkers mit an-

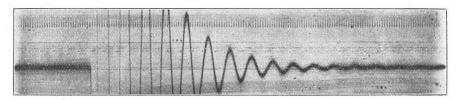


Fig. 2. Eigenschwingung des Empfängers

geschlossenem Empfänger für den in Betracht kommenden Bereich aufgenommen (Fig. 1). Hierzu wurde dem Empfänger in kurzer Entfernung gegenüber ein Sender gleicher Bauart ins Wasser gehängt, der mit einem konstanten Strom veränderlicher Frequenz beschickt wurde. Die Ausgangsspannung des Verstärkers

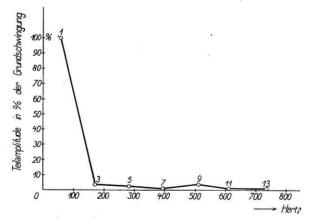


Fig. 3. Harmonische Analyse des Empfängers Nr. 1027

wurde nach der Kompensationsmethode gemessen und als Ordinate aufgetragen, als Abszisse die Frequenz. Zur Bestimmung der Eigenschwingung des Empfängers wurde dieser unter Wasser angeschlagen. Aus der hierbei vom Oszillographen aufgenommenen Kurve (Fig. 2) ergibt sich seine Eigentrequenz zu 56.5 Hertz und die Dämpfung zu 0.56. Die Fourieranalyse dieser Kurve zeigt, daß sie keine Oberschwingung enthält, die störend wirken könnte (Fig. 3).

Größte Sorgfalt wurde auf den zweiten Teil der Apparatur verwendet, der zur Übertragung der Zündungszeit diente. Eine Drahtverbindung kam unter den vorliegenden Umständen nicht in Frage, sondern nur die drahtlose Telegraphie. Am Knallort wurde ein kristallgesteuerter 5 Watt-Kurzwellensender ($\lambda=47.7~\mathrm{m}$) aufgestellt und verschiedene Methoden zur Übertragung der Zeitmarke auf den Sender ausprobiert.

Es war zuerst beabsichtigt, die Zündungszeit, also den Moment, in dem der Strom eingeschaltet, und die Explosionszeit, zu der die Schallaussendung beginnt, getrennt aufzuzeichnen und so die Explosionsverzögerung zu messen, doch gelang dieses nicht, da die Zeitdifferenz so gering war, daß beide Zeichen sich überdeckten. Gleichzeitig war damit festgestellt, daß die Explosionsverzögerung zu vernachlässigen war. Am besten bewährte sich die Schaltung mit einer Doppeltaste, die aus zwei starr miteinander verbundenen, aber elektrisch getrennten Morsetasten bestand, deren Kontakte auf vollkommene Gleichzeitigkeit ein-

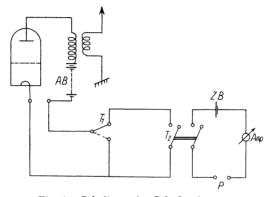


Fig. 4. Schaltung der Schußauslösung. AB Anodenbatterie 200 Volt, ZB Zündbatterie 6 Volt, T_1 Probetaste, T_2 Doppeltaste, P Patrone

gestellt waren. Die eine Taste schaltete den Zündungsstrom ein, die andere gab die Zeitmarke auf den Sender und zwar lag sie im Anodenstromkreis der Senderöhren, so daß beim Einschalten die Hochfrequenzschwingungen einsetzen konnten (Fig. 4).

Von dem exakten Einsetzen der Schwingungen hing alles ab, deshalb wurden vor jeder Aufnahme eine Anzahl Probezeichen gesandt, die auch zur Einstellung des Empfängers dienten. Diese Methode war die einfachste und gab im Oszillographen einen brauchbaren Ausschlag. Der Kurzwellensender war noch mit einer Telephonieeinrichtung ausgestattet, um auch Nachrichten fernmündlich zu übermitteln.

Auf der Empfangsseite stand ein Kurzwellenempfänger, der Audion und zwei Verstärkerstufen für Niederfrequenz enthielt. Die ankommende Welle wurde im Audion gleichgerichtet und mit der durch Rückkopplung erregten Schwingung des Audion zu einem niederfrequenten Interferenzton überlagert, der weiter verstärkt und hinterher wiederum gleichgerichtet wurde. Der Gleichrichterstrom

wurde entweder auf eine dritte Schleife des Oszillographen geleitet oder auf die 500 Periodenschleife, deren Ruhelage dadurch verschoben wurde (Fig. 5). Nachrichten konnten vor dem letzten Gleichrichter abgehört werden. Zur Nachrichtenund Befehlsübermittlung in entgegengesetzter Richtung diente ein 200 Wattsender ($\lambda = 89 \,\mathrm{m}$), dem eine Empfangsanlage am Knallort entsprach.

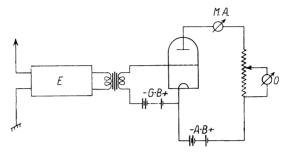


Fig. 5. Empfängerschaltung.

E Empfänger für kurze Wellen, GB Gitterbatterie 12 Volt,
MA Milliamperemeter, O Oszillograph

Versuchsgebiet. Die Versuche wurden in der westlichen Ostsee ausgeführt. Die Eckernförder Bucht war insofern günstig, als sich eine Entfernungsmessung erübrigte, da verankerte Bojen benutzt werden konnten, deren Abstände bekannt waren; ferner war keine wesentliche Strömung vorhanden und die Wassertiefe war recht gleichmäßig etwa 20 m. Die Bojen lagen in 400, 2000, 5000 und 10000 m Entfernung von der Brücke, auf der die Empfangsanlage stand. Auf 2000 m lag die Boje an vier Ankern, so daß der Spielraum sehr gering war, er betrug etwa ± 15 m je nach der Windrichtung; auf 400 und 5000 m trieben die Bojen bis zu 50 m nach außen, da West- und Nordwind herrschte. Wenn man annimmt, daß der Antrieb auf 20% genau geschätzt wurde, so ergibt sich bei der Entfernungsbestimmung ein Fehler von 0.2% für 5000 m, 0.15% für 2000 m und 2.5% für 400 m. Versuche aus 10000 m Entfernung verliefen ergebnislos, da trotz einer Ladung von 50 g kein Schall aufzunehmen war.

Resultate der Ostseeversuche. Die Ergebnisse der Messungen sind Oszillogramme, von denen einige in ihren charakteristischen Teilen wiedergegeben sind (Fig. 6a bis 6c). Sie zeigen von links nach rechts laufend in der unteren Kurve die Schwingungen der Empfängermembran unter dem Einfluß des ankommenden Schalles. Wir sehen, daß der Knall sich am Empfänger nicht als ein kurzer einseitiger Stoß bemerkbar macht, sondern als eine Schwingung, aus verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt, die nicht den Eigenschwingungen der Empfängermembran und Apparatur entspricht; ferner sehen wir, daß die Schalldauer je nach der Entfernung verschieden ist. Die darüberliegenden Striche sind die unteren Spitzen der 500 Periodenkurve, die zur Ausmessung der Oszillogramme mit aufgezeichnet wurde. Der Abstand zweier Spitzen entspricht einer

Zeitdifferenz von 0.002 sec. Die Oszillogramme sind im Original Streifen von mehreren Metern Länge, die zu Beginn durch eine Verschiebung der 500 Periodenkurve den Zeitpunkt der Schußauslösung erkennen lassen. Durch Ausmessen der Länge bis zu den verschiedenen Schalleinsätzen der unteren Kurve wurden die Laufzeiten bestimmt. Die Buchstaben a bis c weisen auf die zugehörigen Werte der Tabelle I hin, die eine Übersicht über die aus den Oszillogrammen erhaltenen Resultate gibt. Die unter I angegebenen Zahlen sind die Laufzeiten des Schalles bis zum ersten erkennbaren Einsatz, II bis zum Ende des Vorläufers

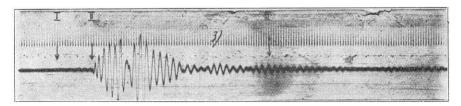


Fig. 6 a

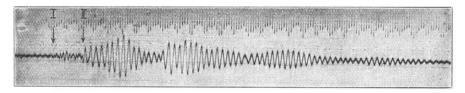


Fig. 6b

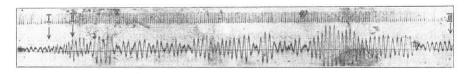


Fig. 6 c

Fig. 6. Schallkurve aus a) 450 m, b) 2000 m, c) 5000 m Entfernung

bzw. Überwiegen der niederen Frequenz, III bis zum Abklingen des Nachhalls. Aus diesen Werten wurde als erstes wichtiges Ergebnis die Laufzeitkurve (Fig. 7) konstruiert.

Die Laufzeitkurve im Wasser von durchschnittlich 20 m Tiefe zeigt ein anderes Verhalten, als man erwartet hatte, und als man es bei ähnlichen Kurven der Erduntersuchung findet. Die als Vorläufer bezeichneten hohen Frequenzen sind eigentlich nicht als solche zu bezeichnen, da sie einen Bestandteil des durch das Wasser gegangenen Schalles darstellen und keine höhere Geschwindigkeit aufweisen als aus den Messungen und Formeln anderer Forscher zu berechnen

war*). Besonders findet die Annahme, daß der Schall einer 2 g Explosion durch den Meeresboden mit höherer Geschwindigkeit merkbar zum Empfänger übertragen wird, in diesen Messungen keine Stütze.

Tabelle 1								
	Nr.	I sec	II sec	III sec	Ladung g	Datum Juli 1929	Temperatur	
$450\mathrm{m}$								
a)		$0.30 \\ 0.30$	$\left. egin{array}{c} 0.320 \ 0.320 \end{array} ight\}$	0.460	$\frac{2}{2}$	12. 12.	$14 - 15^{\circ}$ $14 - 15^{\circ}$	
<i>a</i>)	•/•	0.00	0.020)		_	12.	11 10	
$2000\mathrm{m}$								
b)	1. 3. 5. 7.	1.370 1.298 1.404 1.358	$ \begin{array}{c} 1.396 \\ 1.326 \\ 1.432 \\ \underline{1.373} \end{array} $	1.610	2 2 2 2	9. 9. 8. 8.	14º 14º 14º 14º	
Mittel:		1.358	1.382					
				500	$00\mathrm{m}$			
e)	1. 2. 4. 6. 7. 8.	3.352 3.311 3.408 3.408 3.372 3.422	3.472 3.428 3.434 3.440 3.440 3.450	3.830	6 6 2 2 2 2 2	19. 19. 12. 12. 11.	$20^{\circ} \\ 20^{\circ} \\ 14-15^{\circ} \\ 14-15^{\circ} \\ 13-16^{\circ} \\ 14-15^{\circ}$	
Mittel:		3.390	3.460	nach R	eduktion auf 1	.4º C		

Deutung. Für die Kurven sind nur die 2 g Schüsse verwertet, da von den 6 g Schüssen nur solche aus 5000 m Entfernung vorhanden sind, also keine Vergleichswerte von 2000 und 450 m vorliegen. Man sieht in Fig. 7, daß die Kurven I und II parallel laufen, was sich aus der konstanten Länge des sogenannten Vorläufers ergibt, der eine Zeit von 0.025 sec entspricht. Nur die Kurve III, die die Laufzeiten für das Ende des Wellenzuges verbindet, weicht nach oben ab. Hierin drückt sich die schon oben erwähnte Tatsache aus, daß die Nachhalldauer mit wachsender Entfernung steigt. Die Schallaussendung dauert nur etwa ¹/₁₀ sec, wie Nahschüsse zeigen, und es liegt kein Grund vor anzunehmen, daß dieselben Glühzünder, die sich immer als außerordentlich gleichmäßig erwiesen, weiter draußen in der Bucht einen Schall von längerer Dauer hervorrufen würden. Wir müssen vielmehr den Grund in Reflexionen suchen, die der Schall an den Begrenzungsflächen des Wassers erfährt. Hierdurch tritt eine Art Nachhallwirkung ein. Eine andere Möglichkeit der Erklärung ergäbe sich nur dann noch, wenn man für die Schallgeschwindigkeit im Meeresboden einen geringeren Wert ansetzt

^{*)} Maurer: Ann. d. Hydrogr. 1924, S. 220.

als für Wasser, was aber nach den Untersuchungen über Schallgeschwindigkeiten in den oberen Erdschichten unwahrscheinlich ist. Nehmen wir eine Schallgeschwindigkeit von 2000 m/sec im Meeresboden an und bezeichnen wir in Analogie zur Optik das Medium mit kleinerer Schallgeschwindigkeit als das akustisch dichtere, so können wir auch beim Übergang des Schalles vom Wasser in den Meeresboden einen Grenzwinkel der Reflexion finden, der etwa 48° beträgt. Dieser Grenzwinkel besitzt allerdings nicht die Schärfe, die wir ihm in der Optik zumessen, da Schlammablagerungen und Kraut die Grenze verwischen. An der Wasseroberfläche ist die Reflexion für jeden Winkel fast vollkommen. Der von der Explosion ausgehende Schall trifft unter den verschiedensten Winkeln den

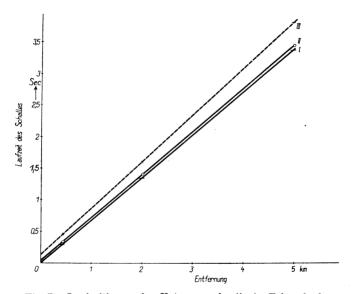


Fig. 7. Laufzeitkurve der Unterwasserknalle in Eckernförde

Boden und wird für einen bestimmten Winkelbereich total reflektiert werden. Dieses Bereich müßte nach obiger Annahme zwischen 48 und 90° liegen, während sich aus der tatsächlich auftretenden Schalldauer ein Winkelbereich von 68 bis 90° ergibt. Alle diese Schallstrahlen geben zusammen am Empfänger ein kompliziertes Schallbild wachsender Länge, das viele durch Interferenz hervorgerufene Amplitudenschwankungen enthält. Die hohen Frequenzen der Vorläufer müßten zwar auch reflektiert auftreten, doch sind sie nicht mit Sicherheit zu erkennen, sie können durch die nachfolgenden Schwingungen verdeckt sein. Da sie eine kleinere Wellenlänge haben, tritt die zerstreuende Wirkung der Oberflächenwellen noch hinzu.

Von dem Frequenzinhalt haben wir bisher nur die hohen Vorläuferfrequenzen erwähnt; der übrige Teil der Oszillogramme enthält Frequenzen, die um 230 Hertz

schwanken. Wir können drei Gruppen festlegen, die bei allen Aufnahmen wiederkehren: Im Vorläufer hauptsächlich 600 bis 700 und 330 bis 350 Hertz, während der nachfolgende Teil Frequenzen um 230 Hertz aufweist. Der Frequenzinhalt ist unabhängig von der Empfangsapparatur, er wurde sowohl bei den Versuchen im Kieler Hafen wie in der Eckernförder Bucht gemessen. Aus ersteren sind einige Oszillogramme geeignet, Aufschluß über die Natur des Vorläufers zu geben. Wir finden dort zu Beginn zwei scharfe Schallstöße von fast 700 Hertz, der Abstand zwischen beiden beträgt wieder 0.025 sec, also ein Wert, den wir auch schon als konstante Zeitdauer des Vorläufers gefunden hatten (Fig. 8). Da dieser Doppelknall bei verschiedenen Entfernungen und Wassertiefen sich zeigte, kann eine Reflexion nicht die Ursache sein. Es ist zu vermuten, daß sie in der Sprengkapsel selbst liegt und daß hierin der Grund für die konstante Länge des Vorläufers zu suchen ist.

Die bisher angegebenen Frequenzen wurden aus den Oszillogrammen durch Ausmessen jeweils einer Periode erhalten. Um ein Bild über alle in den Schall-

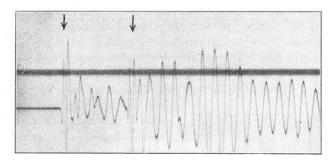


Fig. 8. Schallkurve aus 30 m Entfernung

kurven enthaltenen Schwingungen zu bekommen, wurden sie einer harmonischen Analyse nach Fourier unterworfen. Obgleich diese Methode nur für periodische Vorgänge anzuwenden ist, wurde versucht, sie hier auch für Abschnitte der Schallkurven zu benutzen, die nicht irgendeiner Periode entsprachen, sondern deren Länge willkürlich als Grundschwingung angenommen war. Fig. 9 und 10 zeigen die graphisch aufgetragenen Ergebnisse, als Abszisse die Frequenzen, als Ordinate die Amplituden in Prozenten der Maximalamplitude. Die Verbindung der einzelnen Punkte wurde nur der Übersicht halber vorgenommen. Benutzt wurden die Tafeln zur harmonischen Analyse von Pollak*).

Besonders stark sind die Perioden von 230 bis 250 vertreten, obgleich die Abschnitte so gelegt waren, daß die Vorläuferfrequenz mit erfaßt wurde. Der Grund, daß die Vorläuferfrequenzen so wenig hervortreten, liegt darin, daß diese nur kurze Dauer haben und nur einen Bruchteil des zu untersuchenden Abschnittes

^{*)} Pollak: Tafeln zur harmonischen Analyse 1926.

ausmachen. Sie werden insgesamt betrachtet vollkommen von den tieferen übertönt. Der Empfänger gibt infolge seiner nicht aperiodischen Dämpfung ($\Lambda=0.56$) kein getreues Abbild vom zeitlichen Verlauf der Druckamplituden P, wir müssen vielmehr den Einschwingvorgang und das Abklingen berücksichtigen und die Amplituden daraufhin korrigieren. Die gestrichelte Kurve der Fig. 9 zeigt die

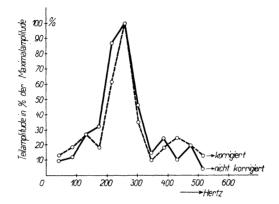


Fig. 9. Harmonische Analyse der Knallkurve, 2 g, 200 m Kiel, mit Empfänger Nr. 1026

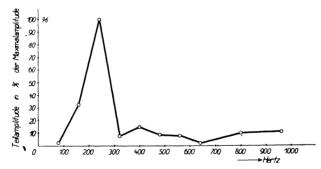


Fig. 10. Harmonische Analyse der Knallkurve 1, 2 g, 2000 m Eckernförde; siehe auch Fig. 6 b

nach der Korrektion für $P={\rm const.}$ und $\varLambda=0.56$ analysierten Werte; der Unterschied gegenüber den nicht korrigierten Werten (ausgezogene Linie) ist unwesentlich.

Betrachtet man die Oszillogramme der 5000 m Schüsse, so drängt sich einem der Vergleich mit dem Rollen des Donners oder eines Kanonenschusses auf. Dort ebenso wie beim Unterwasserknall in großer Entfernung kein kurzer scharfer Knall, sondern ein längerer, fast gleichmäßiger Schalleindruck tiefer Frequenz, dem auch in Luft oft eine dem Zischen ähnliche höhere Frequenz vorausgeht.

Eigentümlicherweise wurde der Vorläufer des Unterwasserknalles bisher bei Entfernungen von wenigen hundert Metern von anderen Beobachtern nicht gefunden, sei es, daß man ihn zur Wasserunruhe rechnete oder infolge seiner geringen Amplitude nicht sehen konnte. Tatsächlich sind jedoch auf den Oszillogrammen der 450 m-Schüsse Schwingungen erkennbar, die als Vorläufer anzusprechen sind, wenn auch ihre Amplitude zu klein ist, um die Frequenz zu erkennen.

Verlängern wir die Kurven der Fig. 7 zur Ordinate, so führt die Richtung der Kurve I in den Nullpunkt hinein, II und III können wir nicht dort beginnen lassen, sie müßten sonst bis 450 m stark und später schwächer divergieren. Ein solcher Verlauf wäre unwahrscheinlich und nicht zu erklären. Bei gradliniger Verlängerung ergeben sich Schnittpunkte mit der Zeitachse, die etwa die Werte 0.02 und 0.15 haben. Man müßte also dem Explosionsvorgang eine Dauer von etwa 0.15 sec zuschreiben.

Der Explosionsvorgang. Hiermit hat uns der Verlauf der Laufzeitkurve auf den zweiten zu behandelnden Fragenkomplex geführt, der sich mit dem Explosionsvorgang selbst befaßt. Wir haben gesehen, daß der Knall eine Schallschwingung mit bestimmten Frequenzen ist, die wir messen konnten. Es ist nun von großem Interesse zu wissen, woher diese Schwingungen stammen und in welchem Maße die Gasblase der Explosion an ihrer Entstehung beteiligt ist. Betrachten wir zuerst den zeitlichen Verlauf, so müssen wir für die Dauer

der Schallaussendung diejenige Zeit ansetzen, die wir aus dem kürzesten Oszillogramm entnehmen. Da die Schalldauer mit der Entfernung zunimmt, legen wir einen Schuß, der nahe dem Empfänger ausgelöst wurde, zugrunde.

Die Oszillogramme von Probeschüssen aus etwa 4 m Entfernung geben für die Dauer des Schalles einen Wert von 0.12 sec bei 2g Ladung. Etwa die gleiche Zeit wurde auch bei Verwendung einer anderen Meßmethode gefunden, die nicht

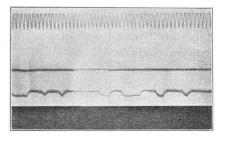


Fig. 11. Stromunterbrechungen durch die Gasblase

den Schalldruck benutzt, sondern bei der die Gasblase zeitweise zwei Elektroden in etwa 10 cm gegenseitigem Abstand überschreitet und dadurch Stromschwankungen hervorruft. Das Oszillogramm Fig. 11 zeigt ein Zurückgehen des Stromes, wenn die Gasblase bei der Expansion die Elektroden überschreitet und umgekehrt beim Zusammenschrumpfen.

Die Ausmessung der Fig. 11 gibt die Werte der Tabelle 2, sie läßt schon erkennen, daß die Gasblase eine atmende Bewegung ausführt.

Eine Änderung des Elektrodenabstandes infolge der Wasserbewegung ist hierbei nicht zu vermeiden, sie ist aber gering, da die Elektrodenkabel durch zwei Pertinaxstreifen auf gleichem Abstand gehalten wurden. Außerdem mußte beim ersten Stoß ein Draht von 0.3 mm Stärke, der zwischen den Elektroden gespannt war, zerrissen werden. Die erste Maximalamplitude kann man nach einer Formel von Ramsauer berechnen*). Ramsauer hat die Gasblasen von

Tabelle 2. Einsatzzeit t und Dauer d der Stromunterbrechung

$t = 0.000 \sec$	$d = 0.009 \sec$	$t = 0.058 \sec$	$d = 0.010 \sec$
0.016	0.002	0.076	0.004
0.025	0.003	0.090	0.003
0.047	0.005		

Unterwasserexplosionen untersucht und ihren maximalen Radius gemessen. Die von ihm angewandte Methode gibt nur jeweils einen Wert, da er einen Magnetanker benutzt, der nach einmaliger Stromunterbrechung nicht wieder angezogen wird. Sie kann also nicht den zeitlichen Verlauf der Explosion registrieren. Eine von ihm empirisch gefundene Formel zur Berechnung des maximalen Radius

$$r_{\max} = 159.3 \sqrt[3]{\frac{\overline{M}}{P}} \text{cm.}$$

worin M die Ladung und P den Gesamtdruck bedeutet, ergibt für die verwendete 2 g Ladung einen Radius von etwa 17 cm. Dieser Wert steht mit meinen Beobachtungen im Einklang.

Das Aufhören der Unterbrechungen in Fig. 11 ist außer auf die Verminderung der Radiusamplitude auch auf das allmähliche Aufsteigen der Gasblase zurückzuführen. Exner hat die Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen im Wasser gemessen**) und berechnet und gibt eine Formel an, die allerdings bis zu 50% größere Werte liefert, als seine Messungen ergeben. Sie lautet:

$$v = \frac{4}{\pi} \sqrt{rg} \text{ m/sec.}$$

Für eine Luftblase von $20\,\mathrm{cm}$ Durchmesser wurde eine Geschwindigkeit von $0.65\,\mathrm{bis}~0.70\,\mathrm{m/sec}$ gemessen.

Druckmessungen bei Unterwasserexplosionen hat Keys nach einer piezoelektrischen Methode ***) angestellt. Er fand auch abklingende Schwingungen, deren Grundnatur immer gleich war. Die Ursache dieser Schwingungen konnte er jedoch nicht feststellen. In 4 m Entfernung konnte er eine Schallgeschwindigkeit von 1675 m/sec messen, bei einer Ladung von 1200 g Schießbaumwolle; sie variiert aber mit der Ladung.

Versuche im Laboratorium. Die bisherigen Versuche ließen einen beweiskräftigen Schluß auf die Bewegungen der Gasblase nicht zu. Es wurden daher

^{*)} Ramsauer: Ann. d. Phys. 73, 265 (1923).

^{**)} F. M. Exner: Phys. ZS. 28, 826 (1927).

^{***)} D. A. Keys: Phil. Mag. 42, 473 (1921).

im Laboratorium weitere Versuche unternommen mit dem Ziel, festzustellen, ob die Gasblase tatsächlich schwingt und wie die Frequenz von der Größe, vom Salzgehalt des Wassers und vom Druck abhängt. Vorsichtshalber wurden nicht so brisante Sprengmittel verwendet, wie die Glühzünder der Westfälisch-Anhaltischen-Sprengstoff A. G., sondern es wurde im Handel erhältliches Rottweiler-P-Pulver benutzt. Die Ladung wurde in dünnwandigen Glaskugeln von 14 bis 18 cm Durchmesser eingeschlossen und durch einen eingeführten Schmelzdraht gezündet. Besonders zu beachten ist hierbei, daß die Verschlußstellen den gleichen Druck aushalten wie die Wandungen, da das Pulver eine mehr treibende als sprengende Wirkung hat und ein gleichzeitiges Platzen aller Wände zur Ausbildung einer einheitlichen Gasblase notwendig ist.

Die Versuche wurden in zwei verschiedenen Wasserbehältern ausgeführt, um einen Einfluß von dieser Richtung auszuschließen. Der eine hatte eine länglich rechteckige Form und 56 cm Wassertiefe, während der andere ein dickwandiger zylindrischer Behälter mit 185 Liter Inhalt bei etwa 75 cm Wassertiefe war, der unter Druck bis zu 10 Atm. gesetzt werden konnte. Die Glaskugel mit der Ladung wurde in ein Messinggestell fest verspannt ins Wasser gehängt. Von diesem Gestell erstreckten sich zwei Metallstäbe von 3 mm Stärke auf die Kugel zu im gegenseitigen Abstand von 1 cm. Sie dienten als Elektroden für einen Strom, der gleichzeitig durch eine Schleife des Oszillographen floß. Bildete sich bei der Explosion eine Gasblase, die sich mit zunehmendem Durchmesser immer weiter über die Elektroden schob, so wurde der Widerstand der Wasserstrecke größer und größer, was sich in einem Zurückgehen des Stromes zeigte.

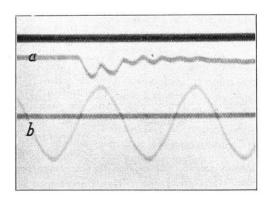


Fig. 12. a) Gasblasenschwingungen. b) 50 Perioden

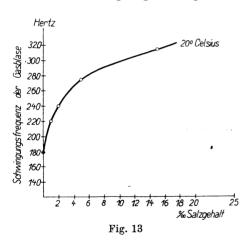
Gasblasenschwingungen. Die auf diese Weise aufgenommenen Oszillogramme zeigen deutlich, daß die Gasblase Schwingungen ausführt (Fig. 12). Hierdurch wird die für Fig. 11 gegebene Deutung bestätigt. In weiteren Versuchen wurde die Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz vom Salzgehalt und Druck bestimmt. Es zeigte sich, daß sie mit wachsendem Salzgehalt ansteigt

und unabhängig von der Ladung, also der Gasblasengröße ist. Beim Ausmessen der Kurven wurde immer das erste Ansteigen unberücksichtigt gelassen, da es nur auf die von der Explosion unabhängige Eigenschwingung der Blase ankam. Die nachfolgende Tabelle 3 gibt die bei verschiedenem Salzgehalt gemessenen Frequenzen wieder. Um stimmgabelähnliche Schwingungen der Elektroden zu vermeiden, wurden beide in halber Länge durch einen Steg aus Pertinax fest verbunden.

Tabelle 3

Salzgehalt in Promille	Frequenz in Hertz	Temp.
0 (20º Härte)	180 - 190	
1	220	
2	230 - 240	20^{0}
5	275 - 280	
15	290 - 330	

Bei den Aufnahmen, die im geschlossenem Behälter unter Druck gemacht wurden, traten bei geringem Salzgehalt bis zu $2^{\circ}/_{00}$ deutlich höhere Frequenzen



auf, die bei 2 Atm. Überdruck etwa das Doppelte und bei 4 Atm. etwa das Vierfache der Grundfrequenz betrugen. Gleichzeitig sank die Amplitude, so daß die Messungen unsicherer wurden. Aus Sicherheitsgründen befand sich bei diesen Versuchen eine Luftblase über dem Wasser, so daß mit steigendem Druck auch der Luftgehalt des Wassers zunahm. Die Eichfrequenz diesen Oszillogrammen betrug bei 50 Perioden. Fig. 13 zeigt die Änderung der Gasblasenfrequenz in Abhängigkeit vom Salzgehalt (Promille).

Während bei den Glühzündern die Schallkurven bis auf 230 Hertz

abnehmende Frequenzen zeigen, nähert sich die Gasblasenfrequenz beim P-Pulver von tieferen her dieser Grundfrequenz. Der Unterschied ist wohl in den verschiedenen Verbrennungsgeschwindigkeiten der beiden Sprengmittel zu suchen.

Theoretische Betrachtungen. Die Schallgeschwindigkeit in Seewasser, deren Bestimmung zwar nicht die Hauptaufgabe dieser Arbeit war, die sich aber hierbei mit ergab, läßt sich nach der Formel berechnen:

$$v = \sqrt{\frac{\varkappa}{\beta \varrho}} \quad \cdots \quad (1)$$

Worin \varkappa das Verhältnis der spezifischen Wärmen, β die Kompressibilität und ϱ die Dichte ist. Diese Gleichung ist für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit im freien Seewasser ungünstig, da die Größen β und ϱ stark vom Salzgehalt, Druck und Temperatur abhängen und der Messung nicht so leicht zugänglich sind. Maurer*) benutzt daher eine Formel, die den praktischen Bedürfnissen entspricht und für Salzgehalte zwischen 10 und $35^{\,0}/_{00}$, also auch für den der Ostsee, recht genaue Werte gibt; danach ist:

$$v = 1445 + 4.46 t - 0.0615 t^2 + (1.2 - 0.015 t) (S - 35)$$
 m/sec . . . (2)
 $S =$ Salzgehalt in Promille, $t =$ Temperatur in Celsiusgraden.

Die bei der Aufnahme der Laufzeitkurve sich ergebenden Geschwindigkeiten stimmen mit den nach dieser Formel berechneten gut überein. Die Formel ergibt für $S=15^{0}/_{00}$ und $t=14^{0}$ ein v=1475.4 m/sec. Die Laufzeiten geben nach Reduktion auf 14^{0} einen Mittelwert von:

3.39 sec für 5000 m,
$$v = 1475$$
 m/sec,

und

1.358 sec für 2000 m,
$$v = 1473$$
 m/sec.

Die Abweichung vom berechneten Wert beträgt im letzten Fall noch nicht $2^{0}/_{00}$. Für Wasser mit geringem Salzgehalt genügt diese Formel nicht mehr. Die Schallgeschwindigkeit für destilliertes Wasser ist nur in Röhren gemessen und die Werte sind nachträglich auf den freien Wasserraum korrigiert worden. Für geringe Salzgehalte zwischen 0 und $10^{0}/_{00}$ sind keine zuverlässigen Werte bekannt. Die bei Explosionen zu erwartende Überschallgeschwindigkeit tritt auch im Wasser auf; sie hängt stark von der Größe der Ladung ab, wie Ramsauer und Keys zeigten. Bei unseren Versuchen ist die Ladung so klein, daß ihre Wirkung auf die Geschwindigkeitsmessung zu vernachlässigen ist.

Die Vermutung, daß die Gasblase Schwingungen ausführt, ist durch die Versuche im Laboratorium als erwiesen anzusehen. Lassen wir sowohl bei den Schallkurven der Ostseeversuche als auch bei den Bewegungskurven des Gasblasenradius die Anfangsschwingungen unberücksichtigt, so bleiben noch die Endschwingungen. Diese sind deshalb besonders interessant, weil die in der Ostsee und die im Laboratorium gemessenen fast übereinstimmen, trotzdem sie sich unter ganz verschiedenen Bedingungen gebildet haben.

Will man die Frequenz berechnen, so wird man folgende Tatsachen berücksichtigen müssen:

- 1. Die Frequenz ist unabhängig von der Größe der Gasblase (bis 20 cm).
- 2. Die Brisanz des Sprengstoffes, sowie die Ausdehnung der umgebenden Wassermassen hat keinen merkbaren Einfluß auf die Frequenz.
- 3. Eine Änderung der Periode tritt nur bei Änderung der Eigenschaften des Wassers auf (Salzgehalt, Temperatur und Druck).

^{*)} Maurer: Ann. d. Hydrogr. 1924, S. 220.

- 4. In der Ostsee wurde die Frequenz der Endschwingungen auch ohne Sprengung in der allgemeinen akustischen Unruhe des Wassers zeitweilig beobachtet.
- 5. Eine Eigenschwingung der Apparatur ist nicht der Grund, da im Laufe der Versuche sämtliche Teile einmal ausgeschaltet bzw. durch andere ersetzt wurden. Auch der Oszillograph selbst, sowie der Aufstellungsort der gesamten Apparatur wurde gewechselt, ebenso die Tauchtiefe des Empfängers und des Glühzunders.

Aus den bisher bekannten Versuchsresultaten läßt sich eine empirische Formel aufstellen, welche die Frequenz der Gasblase zu berechnen gestattet. Sie lautet:

$$n = a (v - b).$$

Darin sind a=4.6 und b=1425 Konstanten; v, die Schallgeschwindigkeit, ist aus Gleichung (2) S. 15 zu berechnen oder aus bekannten Versuchsresultaten zu entnehmen. Gleichung (2) gilt nur für $S>10^{0}/_{00}$; für $S=0^{0}/_{00}$ ist v aus den für destilliertes Wasser gefundenen Daten zu entnehmen.

Übersicht. Es wird berichtet über Versuche in der Ostsee, die die Festlegung der Laufzeitkurve für Unterwasserexplosionen kleiner Ladung zum Ziele hatten. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe von 2 g-Glühzundern als Schallquelle und oszillographischer Aufzeichnung am Empfangsort die Laufzeiten des Schalles mit großer Genauigkeit gemessen werden. Es zeigt sich, daß der aufgezeichnete Schall keine Schichten höherer Schallgeschwindigkeit durchläuft, wie es nach den analogen Versuchen der Seismik zu erwarten war, sondern sich mit normaler Geschwindigkeit im Wasser fortpflanzt. Die zur Messung benutzten Entfernungen betrugen 450, 2000 und 5000 m; in diesem Bereich ist die Laufzeitkurve eine Die Oszillogramme lassen erkennen, daß der Schall am Empfangsort nicht einem kurzen scharfen Knall entspricht, sondern länger andauernde, einem Nachhall ähnliche Schwingungen zeigt. Die Dauer dieses Hallens nimmt mit wachsender Entfernung zu. Der erste bisher als Vorläufer bezeichnete Teil der Schallkurven ist unabhängig von der Entfernung. In ihm überwiegen Frequenzen von 600 bis 700 Hertz, während im nachfolgenden zweiten Teil solche von 200 bis 250 Hertz vorherrschen.

Es wird durch Laboratoriumsversuche unter den verschiedensten Versuchsbedingungen nachgewiesen, daß die bei der Explosion entstehende Gasblase radial schwingt, und es wird die Abhängigkeit ihrer Schwingungsfrequenz vom Salzgehalt und Druck gemessen. Zum Schluß wird eine empirisch gefundene Formel zur Berechnung dieser Frequenz angegeben.

Meinem verehrten Lehrer Herrn Prof. Dr. M. Reich, sowie Herrn Dr. R. Kühnhold, Kiel, bin ich für die Anregungen und die Unterstützung bei dieser Arbeit zu großem Dank verpflichtet.

Göttingen, Institut für angewandte Elektrizität, den 31. Juli 1931.