ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 62.

1. *Quantitative Unterwasserschallversuche; von H. Barkhausen und H. Lichte.*

(Mitteilungen aus dem Laboratorium der Torpedoinspektion.)

I. Das Problem.

Die Schallerzeugung im Wasser und die im Vergleich zur Luft ziemlich gute Fähigkeit des Wassers, den Schall auf große Entfernungen zu übertragen, ist seit langem bekannt. Schon Leonardo da Vinci hatte die Erfahrung gemacht, daß man Schiffe auf See mittels einer in das Wasser gesteckten Tuba hört. Er schreibt darüber: „Wenn Du Dein Schiff anhalten wirst und den Kopf eines Sprachrohres auf das Wasser setzen und das andere Ende an Dein Ohr, so wirst Du Schiffe hören, die recht weit von Dir entfernt sind.“¹⁾ Es sei ferner auf die Versuche von Beudant (1820), sowie von Sturm und Colladon²⁾ auf dem Genfer See (1827) hingewiesen, die mit ganz einfachen Mitteln schon eine Reichweite von 15 km, später sogar von 35 km erzielten. In neuerer Zeit, seit etwa 20 Jahren, sind die Unterwasserschallsignale auch praktisch in der Marine zum Ansteuern von mit Unterwasserglocken ausgerüsteten Feuerschiffen verwandt worden und zwar mit gutem Erfolge. In der Kriegsmarine erhielten sie eine ganz besondere Bedeutung mit der erhöhten Verwendungsfähigkeit der Unterseeboote. Waren sie doch für diese im getauchten Zustand zunächst das einzige Mittel, sich mit der Außenwelt zu verständigen.

Längere Zeit dachte man sogar in der Marine an die

1) Leonardo da Vinci, Der Denker, Forscher und Poet. Auswahl von Marie Herzfeld. S. 43. Fortpflanzung des Schalles in flüssigen und in festen Körpern. 3. Aufl. Jena 1911. Eugen Diederichs.

2) Colladon et Sturm: Ann. chim. et phys. (2) **36**. S. 113, 225. 1827; Pogg. Ann. **12**. S. 39, 161. 1828. Beudant: von Colladon und Sturm erwähnt.

Möglichkeit, die drahtlose Telegraphie mit elektromagnetischen Wellen durch die Unterwasserschalltelegraphie (U. T.), die militärisch manche Vorteile bieten würde, zu verdrängen. Waren doch schon mit den ersten einfachen Apparaten gelegentlich Reichweiten von 100 km und mehr erzielt worden. Wenn man diese Reichweiten nicht dauernd erhielt, so schob man die Schuld auf die Unvollkommenheit der Apparate, der Sender und Empfänger. Als Empfänger wurden nämlich Mikrophonempfänger verwandt, von denen bekannt ist, daß sie in der Empfindlichkeit stark schwanken. Selbst die besten in der Fernsprechtechnik verwandten Mikrophone schwanken um 200—300 Proz. und bei Spezialausführungen kann man durch sorgfältige Einstellung, die man einfach durch Probieren ermitteln muß, oft enorme Empfindlichkeiten erzielen, die das 10—100fache der normalen betragen. Die anfangs benutzten Mikrophone waren einstellbar und daher besonders schwankend.

Auch auf Unregelmäßigkeiten am Sender führte man die beobachteten starken Schwankungen in der Reichweite der U. T. zurück. Es wurden meist Sirenen verwandt, bei denen sich die rotierenden aufeinanderschleifenden Teile stark abnutzten. An „Verwehungen“ des Schalles, wie sie in der Luft vorkommen, hatte man beim Wasser nicht gedacht. Sie schienen hier unmöglich zu sein.

Der Beginn des Krieges, mit dem der eine von uns auch als wissenschaftlicher Hilfsarbeiter bei der Torpedoinspektion eintrat, gab der U. T. eine erhöhte Bedeutung. Es schien da erforderlich, zunächst einmal die grundlegende Frage zu klären, welchen Einfluß das Wasser bei der Ausbreitung des Schalles habe. Denn hiervon hing ja die ganze Entwicklungsmöglichkeit der U. T. ab.

Bei jedem Ausbreitungsvorgang hat man zwischen zwei Arten der Energieabnahme zu unterscheiden:

1. Der durch die räumliche Ausbreitung, d. h. die Verteilung der Energie auf immer größer werdende Flächen. Bei Kugelwellen folgt hieraus eine quadratische Abnahme mit der Entfernung vom Sender. Bei dieser Ausbreitungsart bleibt die Energie an sich erhalten, im Gegensatz zu der

2. Abnahme der Energie durch Absorption, Zerstreuung oder dgl. In diesem Falle wird überall im Medium ein Teil

der Schallenergie in Energie anderer Form, beispielsweise Wärme umgewandelt, oder durch unregelmäßige Zerstreuung oder dgl. der weiteren Ausbreitung entzogen. Das wesentliche ist, daß wir dann pro Kilometer immer dieselbe Abnahme auf einen bestimmten Bruchteil haben, ganz gleichgültig, ob die Entfernung vom Sender groß oder klein ist. Die Abnahme erfolgt nach einer Exponentialfunktion.

Im allgemeinen wirken beide Faktoren zusammen. Dann überwiegt bei kleinen Entfernungen die quadratische Abnahme, bei großen Entfernungen die exponentielle. Solange das quadratische Gesetz noch gültig ist, läßt sich die Reichweite durch Verbesserung der Apparate noch wesentlich erhöhen. Eine Steigerung der Senderleistung oder der Empfängerempfindlichkeit auf das 100fache ergibt eine 10fache Reichweite, d. h. beispielsweise von 10 km auf 100 km. Sobald aber die exponentielle Abnahme überwiegt, ist praktisch durch eine Verbesserung der Apparate fast gar nichts mehr zu gewinnen. Nehmen wir z. B. eine Abnahme auf die Hälfte pro km an, so ergibt sich für n km eine Abnahme auf $(\frac{1}{2})^n$, d. i. für $n = 10$ km auf $\frac{1}{1000}$. In diesem Falle würde also eine Steigerung der Senderenergie oder Empfängerempfindlichkeit auf das 1000fache nur eine Steigerung der Reichweite um 10 km, d. h. z. B. von 10 auf 20 km, bewirken. Eine nochmalige Steigerung der Senderleistung auf das 1000fache, d. h. also auf das 1000000fache der ursprünglichen, würde wieder nur 10 km weiter, also auf 30 km reichen. Man sieht, daß dann 100 km niemals zu erreichen sind.

Auf Grund dieser Überlegungen hielten wir eine genaue Untersuchung der Ausbreitung des Schalles im Wasser für erforderlich, und zwar kam es weniger auf die Bestimmung der maximalen Reichweite an, die ja bisher schon oft gemessen war, als auf die viel schwierigere Untersuchung, nach welchem Gesetze die Abnahme der Schallenergie auf dem ganzen Wege erfolge.

II. Apparate und Meßverfahren.

1. Sender.

Zur Ausführung der Versuche standen seinerzeit verschiedene Sender und Empfänger zur Verfügung. Wenn wir

uns zunächst mit den Sendern befassen, so traf es sich sehr glücklich, daß gerade zu der Zeit, in der mit den Versuchen begonnen wurde, zwei *elektrisch betriebene Schallsender*, der Fessenden Oszillator der Submarine Signal Co. in Boston und der Elektromagnetsender der Signal-Gesellschaft m. b. H. in Kiel, bekannt wurden. Beide Sender sind im wesentlichen große Telephone, nur nach anderen Gesichtspunkten konstruiert. Die Membran wird elektromagnetisch durch Wechselstrom in Schwingungen versetzt und gibt ihre Energie als Schall an das Wasser ab. Die Membran und das sie erregende mechanische System haben deutlich ausgesprochene Eigenschwingungen, kommen also nur bei Resonanz stark ins

Fig. 1.

Schwingen. Es zeigte sich, daß die zugeführte elektrische Leistung, die an einem eingeschalteten Wattmeter unmittelbar abgelesen werden konnte, in gleicher Weise bei Resonanz stark anstieg, wie aus Fig. 1 zu erschen ist. Da bei der Aufnahme dieser Kurve die Stromstärke absichtlich konstant gehalten wurde, sollte man ohne mechanische Schwingungen die punktierte Linie erwarten, da die Kupfer- und Eisenverluste mit der Frequenz langsam ansteigen. Die schraffiert gezeichnete Fläche, die eine normale Resonanzkurve bildet, überlagert sich diesen Verlusten. Sie stellt die durch die mechanischen Schwingungen verursachten Verluste dar, die zum Teil durch innere Dämpfung verloren gehen, zum größten Teil aber akustisch ausgestrahlt werden. Daß der erstere Teil

sehr klein war, ergab sich durch den Vergleich mit der Aufnahme der Resonanzkurve in Luft (Fig. 2), die wegen des Fehlens der Strahlungsdämpfung außerordentlich scharf war, also anzeigte, daß die innere Dämpfung sehr viel kleiner war. Für genaue Bestimmungen kann ihr prozentualer Anteil leicht in Rechnung gesetzt werden.¹⁾

Beide Apparate waren mit Gleichstrom polarisiert; die magnetische Anzugskraft war daher proportional dem Produkt aus der Gleichstrom- und der Wechselstromstärke. *Dann mußte die ausgestrahlte Leistung quadratisch mit dem Produkt dieser beiden Stromstärken wachsen.* Diese Folgerung fand sich auch experimentell weitgehend bestätigt. Verminderung allein der Wechselstromstärke auf $1/n$ verminderte den Aus-

Fig. 2.

schlag am Wattmeter auf $1/n^2$, und zwar sowohl in der Resonanz wie außerhalb derselben. Man erhielt also wieder genau die Fig. 1, nur mit einem um $1/n^2$ verminderten Strommaßstab. Verminderung der Gleichstromstärke auf $1/n$ verminderte dagegen nur die Größe der schraffierten Fläche auf $1/n^2$, so daß die schwächer werdende mechanische Resonanzerscheinung gegenüber den konstanten elektrischen Verlusten bald gar nicht mehr hervortrat.

Das quadratische Gesetz fand sich weitgehend gut bestätigt. Nur bei großen Stromstärken trat schließlich Sättigung ein. Beim Fessenden Oszillator änderte sich gelegentlich auch

1) Diese Fragen sind inzwischen von den Herren Hahnemann und Hecht genauer untersucht worden. Vgl. Phys. Zeitschr. 20. S. 104, 245. 1919.

die Resonanzlage mit der Stromstärke, wenn die Vorspannung seiner inneren Membranen ungünstig gewählt wurde. Die Elastizität der sich durchbiegenden Membran, die hier für die Resonanzlage maßgebend ist, ist nämlich vom Ausschlag abhängig. Daher treten auch gelegentlich sogenannte „Kipperscheinungen“ auf, ein plötzliches Umspringen des Schwingungszustandes bei einer gleichmäßigen Änderung der Frequenz, und zwar bei zu-

Fig. 3.

nehmender Frequenz an einer andern Stelle als bei abnehmender (Fig. 3). Die gleichen Erscheinungen sind bei elektrischen Schwingungskreisen mit Eisenkernspulen bekannt.¹⁾ Auch bei diesen ist die Selbstinduktion und damit die Resonanzlage von der Stromstärke abhängig. — Beim Sender der Signal-Gesellschaft wurde niemals eine Verschiebung bemerkt. Bei diesen werden als elastische Zwischenglieder longitudinal beanspruchte Stäbe benutzt, deren Elastizität bekanntlich bis an die Grenze

1) Vgl. Barkhausen, Labile Zustände elektrischer Systeme. Verh. d. D. Phys. Ges. XL S. 267. 1909.

der Zerreißfähigkeit konstant ist. Daher ist der Sender der Signal-Gesellschaft zu Meßzwecken hervorragend geeignet.

Der mechanisch - akustische Schwingungsvorgang wurde auch rechnerisch untersucht¹⁾ und gute Übereinstimmung mit den Messungen gefunden. Besonders gab die folgende Erscheinung eine gute Bestätigung.

Bei Druckschwankungen von 1 Atm. berechnet sich die akustisch ausgestrahlte Leistung im Wasser zu $0,3 \text{ Watt/cm}^2$, so daß eine Membran von 1000 cm^2 „wirksamer Fläche“ 300 Watt ausstrahlt. Höhere negative Druckschwankungen sind aber, falls der Sender nicht tief untergetaucht wird, unmöglich, da sonst *Vakuumbildung* eintritt, das Wasser sich von der Membran löst. In der Tat beobachtete man eine starke, schaumartige Blasenbildung an der Sendermembran, wenn die am Wattmeter angezeigte Leistungsdifferenz 300 Watt überschritt. Gleichzeitig schwankte der Zeiger des Instrumentes unregelmäßig hin und her, während er sonst ruhig feststand. Tauchte man den Sender tiefer unter, trat das Schwanken erst bei einer höheren Leistung ein. So konnte also experimentell das Eintreten einer bestimmten Druckschwankung sicher festgestellt werden und da sich dafür die akustisch ausgestrahlte Leistung in gleicher Höhe errechnete wie die am Wattmeter angezeigte Differenz, ist ihre Identität sichergestellt.

Hieraus folgt übrigens weiter ein wichtiges Konstruktionsprinzip, nämlich daß die Membran eines Senders eine durch die Senderleistung und die Eintauchtiefe bestimmte Größe nicht unterschreiten darf, damit keine Blasenbildung eintritt.

Daß die in Fig. 1 schraffierte Leistungsdifferenz tatsächlich akustisch ausgestrahlt wurde, wurde schließlich noch geprüft an einem aperiodischem Telephon, das in der Nähe des Senders ins Wasser gehängt wurde und auf ein Duddelgalvanometer geschaltet war. Die Ausschläge an diesem Galvanometer sind proportional dem Quadrat der durchfließenden Stromstärke, in unserem Fall also dem Quadrat der Schwingungsweite der Telephonmembran, d. h. direkt proportional der das Telephon treffenden akustischen Leistung.

1) Vgl. hierzu Hahnemann und Hecht, Phys. Zeitschr. 17. S. 601. 1916 und 18. S. 261. 1917.

In der Tat erhielten wir bei Änderungen der Frequenz des den Sender speisenden Wechselstromes am Galvanometer eine Resonanzkurve von derselben Form wie die in Fig. 1 gezeichnete schraffierte Fläche. Auch blieb bei Änderung der Gleich- oder Wechselstromstärke am Sender der maximale Ausschlag am Duddelgalvanometer stets proportional der maximalen Erhöhung des Wattverbrauches am Sender; das Verhältnis beider ist konstant wie die folgende Tabelle zeigt.

Differenz im Wattverbrauch	Ausschlag am Galvanometer	Verhältnis beider
280	45°	6,2
95	18°	5,3
160	30°	5,3
45	9,5°	4,7

Das war ein weiterer Beweis dafür, daß die Differenz im Wattverbrauch tatsächlich als Schallenergie ausgestrahlt wurde.

Durch diese Messungen wurde wohl zum ersten Male, wie uns scheint, *in einwandsfreier Weise die von einer Schallquelle akustisch ausgestrahlte Leistung festgestellt*. Dies war auch praktisch in zweierlei Hinsicht wichtig. Zunächst ergab sich hieraus der Wirkungsgrad der Sender in der Resonanzlage zu etwa 50% (vgl. Fig. 1). Eine wesentliche Erhöhung der Lautstärke war also nicht mehr durch Verbesserung der Apparate, sondern nur durch Steigerung der zugeführten Leistung möglich. Und zweitens konnte mit einem einmal geeichten Sender durch einfaches Regulieren der Stromstärken jede gewünschte Lautstärke quantitativ genau hergestellt werden, und zwar herab bis zu den kleinsten Lautstärken. Im allgemeinen wurde der Gleichstrom konstant gehalten und der Wechselstrom verändert. Dann ergab z. B. ein Sender 4 Watt ausgestrahlte Leistung pro 1 Amp.² Wechselstrom, also 100 Watt bei 5 Amp., $\frac{4}{100}$ Watt bei $\frac{1}{10}$ Amp., $4 \cdot 10^{-6}$ Watt bei 10^{-3} Amp. usw. Hiervon wurde bei der Empfängerprüfung und bei den Reichweitenversuchen weitgehendst Gebrauch gemacht.

Außer den elektrischen Sendern wurden gelegentlich auch mit Druckwasser betriebene, von der Signal-Gesellschaft hergestellte *Sirenen* benutzt. Bei diesen kann die ausgestrahlte

Schalleistung nicht gemessen und somit auch nicht auf ihre Konstanz geprüft werden. Sie kann nur unter der wohl kaum exakt bestehenden Voraussetzung berechnet werden, daß der pulsierend austretende Wasserstrom zerlegt werden kann in einen gleichförmigen akustisch unwirksamen und einen sinusförmigen, hin und zurückflutenden Anteil, dessen Amplitude A etwa gleich der mittleren, gleichförmigen Strömung zu setzen ist, da ja der Wasserstrom zeitweise ganz null wird. Die Rechnung sei hier nur kurz angedeutet.

Das Geschwindigkeitspotential eines von einer Schallquelle ausgehenden Zuges von harmonischen Wellen ist

$$\varphi = - \frac{A}{4\pi r} \cos \pi (at - r).$$

Daher ist der gesamte durch eine Kugel vom Radius r hin und her pulsierende Strom

$$4\pi r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} = A \cos \pi at,$$

wenn $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ ist. A ist der Maximalbetrag der an der Schallquelle zugeführten Strömung. Nach Raleigh¹⁾ beträgt nun in diesem Fall die von der Schallquelle in den Raum ausgestrahlte Leistung

$$W = \frac{\rho \pi^2 a A^2}{8\pi} = 1,05 \frac{n^2}{10^5} A^2 \text{ erg/sec.}$$

Setzen wir A in lit/sec ein, so erhalten wir

$$W = 1,05 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 A_{\text{lit/sec}}^2 \text{ Watt.}$$

Bei den benutzten Sirenen war A etwa 10 lit/sec, also die ausgestrahlte Leistung bei der Frequenz $n = 1000/\text{sec}$ etwa 100 Watt. Da der Betriebsdruck etwa 6 Atm. betrug, berechnet sich der Wirkungsgrad zu nur 2 Proz. Die Rechnung ist daher nur mit Vorsicht hinzunehmen, da durch andere mitschwingende Teile, z. B. das Zuleitungsrohr, auch noch Schall erzeugt werden kann.

1) Raleigh, Theorie des Schalles. Deutsch von Neesen. II. S. 128 ff. 1880.

Ein Vergleich der beiden zur Verfügung stehenden Sendertypen, der freilich wegen des sehr verschiedenen Toncharakters recht ungenau ist, ergab für beide die gleiche Größenordnung der ausgestrahlten Schalleistung (300 Watt).

2. Empfänger.

Als Empfänger wurden aus Gründen der Einfachheit und Bequemlichkeit in der Hauptsache *Mikronenempfänger* benutzt, in einer Ausführung, wie sie im wesentlichen auch auf Handelsschiffen zum Abhören von Unterwasserglockensignalen benutzt werden. Die Mikrophone sind in Bronzekapseln wasserdicht eingeschlossen (Fig. 4). Ein Teil der Kapselwand

Fig. 4.

wird gebildet aus der die Schallwellen aufnehmenden Membran, mit der das eigentliche Mikrophon *M* akustisch leitend in Verbindung steht. Die Stromzuführung übernimmt ein wasserdicht in die Kapsel eingezogenes Gummiaderkabel. Die Mikrophone konnte man vom Empfangsschiff aus am Kabel leicht beliebig tief ins Wasser hängen. Ihre Schaltung ist aus Fig. 5 zu ersehen. Der Gleichstrom *J* wurde zwei bis drei Trockenelementen *E* entnommen und durch einen Regulierwiderstand *R*, auf 50 Milliampere einreguliert. Die durch die Schallwellen entstehenden Stromschwankungen wurden durch den Transformator *T* dem Fernhörer *F* zugeführt. Die *Lautstärkemessung* geschah nach der Parallel ohmmethode, indem der Widerstand *R* so lange verkleinert wurde, bis der Senderton gerade nicht mehr im Fernhörer wahrnehmbar war. Diese

Einstellung war auf etwa 20 Proz. genau, Nebengeräusche im Mikrophon oder am Meßort verursachten freilich oft wesentlich größere Fehler. Die „Lautstärke“ wurde berechnet nach der Formel

$$L = 1 + \frac{1000}{R},$$

indem der Kombinationswiderstand T parallel $F = \frac{T \cdot F}{T + F}$ für Wechselstrom etwa 1000 Ohm betrug.¹⁾ F war ein 1000-ohmiger Fernhörer mit einem Wechselstromwiderstande

Fig. 5.

von etwa 3000 Ohm. Die so berechnete „Lautstärke“ ist zunächst nur ein Maß für die vom Mikrophon erzeugte Wechselstromstärke und es war zu prüfen, welche akustische das Mikrophon treffende „Wasserlautstärke“ dieser entsprach. Ein roher Versuch zeigte schon, daß hier sehr große Fehler unvermeidlich sind. Eine geringe Umlagerung der Mikrophonkontakte, wie sie oft bei den geringsten Erschütterungen schon eintrat, konnte die gemessene „Lautstärke“ um das zwei- bis dreifache ändern, obwohl die Wasserlautstärke genau konstant gehalten wurde. Es hat in diesem Falle gar keinen Zweck, eine möglichst genaue Einzelmessung zu machen. Dagegen erhält man einigermaßen brauchbare Resultate, aus denen sich auch Gesetzmäßigkeiten ableiten lassen, wenn man das Mittel aus sehr vielen Messungen, die unregelmäßig durcheinander liegen, nimmt. So wurde die Beziehung zwischen berechneter und Wasserlautstärke in folgender Weise geprüft. Sechs Empfänger wurden in 1—5 m Abstand vom Sender ins Wasser gehängt. Zum Empfangstelephon parallel lagen abwechselnd

1) Die übliche Rechnung, bei der nur die Stromverzweigung zwischen R und F betrachtet wird, ist falsch. Bei kleinerem Widerstande T reguliert R z. B. praktisch erst von da ab, wo es kleiner als T wird.

durcheinander die Widerstände $R = 1, 10, 100, \infty$ Ohm, was also berechneten Lautstärken von 1000, 100, 10, 1 entspricht. Für jede Widerstandsstufe wurde mehrmals diejenige Senderstromstärke bestimmt, bei der man gerade noch auf dem Empfänger einen Ton hörte. Obwohl die so bestimmten Senderstromstärken unter denselben Bedingungen oft mehr als 1:3 voneinander abwichen, ließ sich doch deutlich erkennen, daß die Änderungen der Senderstromstärke durchweg geringer waren als die zugehörigen Lautstärken. Bei tiefen Perioden war die Senderstromstärke sehr nahe der Wurzel aus der nach obiger Formel berechneten Lautstärke proportional, d. h. eine Änderung von R im Verhältnis 1:100 trat schon bei einer Änderung der Stromstärke von 1:10 ein. Hiernach wäre die berechnete Lautstärke nicht ein Maß für die Amplituden, sondern für deren Quadrat, d. h. für die akustische Leistung im Wasser. Bei höheren Periodenzahlen war aber mehr das Umgekehrte der Fall.

Mit einem geeichten Sender, bei dem die ausgestrahlte Leistung pro Ampere bekannt war, konnte so auch eine *absolute Eichung* der Empfänger vorgenommen werden unter der Annahme, daß die Ausbreitung der Schallenergie in geringen Abständen vom Sender quadratisch vor sich geht, die Schalldichte sich also aus der Senderleistung dividiert durch die Oberfläche der Kugel mit dem Empfängerabstand als Radius berechnen läßt.¹⁾ Daß der Sender nach allen Seiten gleich stark wirkte, wurde durch Drehen des Senders nachgewiesen. Es ergab sich, daß eine Schalldichte von der Größenordnung 10^{-15} Watt/cm² am Ort des Mikrophons erforderlich war, um einen hörbaren Ton zu erzeugen. Das menschliche Ohr braucht etwa 10^{-18} Watt/cm². Das steht in guter Übereinstimmung mit der beobachteten Tatsache, daß der Schall unter Wasser in dem Luftraum z. B. eines Unterseebootes mit dem bloßen Ohr etwas schlechter empfangen

1) Streng genommen müssen hierbei Sender und Empfänger von allen reflektierenden Wänden, also von dem Grund und der Wasseroberfläche einen Abstand haben, der groß gegen ihren gegenseitigen Abstand ist. Dieser muß andererseits groß gegen die Senderabmessungen sein. Diese Bedingungen sind schwer zu erfüllen und waren es bei der Eichung auch nicht, so daß nur die Größenordnung richtig ist.

wird als mit der Unterwasserschallapparatur. Es geht ja nur etwa $\frac{1}{1000}$ des Schalles vom Wasser in die Luft über.

Wegen der großen Inkonstanz der Mikrophone wurden, wo es die Verhältnisse gestatteten und es auf sehr genaue Messungen ankam, besonders bei den ersten genauen Versuchsreihen neben dem Mikrophon auch die vorher erwähnten elektrischen *Sender als Empfänger* benutzt. Die Wirkungsweise der elektrischen Sender als Empfänger ist dieselbe, wie die eines angesprochenen Telephons. Infolge der Membranschwingungen und der dadurch bewirkten Änderung des magnetischen Flusses werden in der Magnetspule des Apparates elektromotorische Kräfte induziert, die in einem unmittelbar angeschalteten Telephon einen Ton erzeugen. Die Lautstärke wurde auch hier durch Schwächung des Stromes bis zum Verschwinden des Tones gemessen. Da Sender und zugehöriges Telephon zusammen nur 40 Ohm wirksamen Widerstand hatten, wurde die Schwächung nicht durch Parallelwiderstand, sondern durch einen Vorschaltwiderstand hergestellt (Fig. 6).

Fig. 6.

Die Lautstärke berechnet sich dann nach der Formel

$$L = 1 + \frac{R}{40}.$$

$R = 0$ ergibt die Lautstärke 1, d. h. die kleinste, eben noch hörbare Lautstärke. Bei sehr großen Lautstärken, nur wenige Meter vom Sender entfernt, konnte der akustisch induzierte Empfangsstrom unmittelbar durch ein an Stelle des Fernhörers F eingeschaltetes Milliampereometer gemessen werden. Diese sehr genaue Messung wurde nochmals zur Prüfung der Theorien benutzt. Wie zu erwarten, ergab sich Proportionalität dieses Stromes mit der Senderwechselstromstärke, sowie der Erregerstromstärke des Senders und der des Empfängers. Nur bei sehr großen Stromstärken traten Sättigungserscheinungen ein. Es ist zu beachten, daß neben dem Sender jetzt auch

der Empfänger eine ausgesprochene Resonanz besaß, und beide im allgemeinen nicht genau übereinstimmten. Das letztere war bis zum gewissen Grade eine Erleichterung. Wurde nämlich eine mittlere Frequenz eingestellt, so konnte diese in ziemlich weiten Grenzen geändert werden, ohne daß der Empfangsstrom sich änderte.

Die Empfindlichkeit des Senders als Empfänger war etwa zehnmal geringer als die guter Mikrophone.¹⁾ Dafür war aber die sicher gewährleistete Konstanz der Messung ein sehr großer Vorteil. Freilich brachte die Verwendung der Sender als Empfänger erhebliche Schwierigkeiten mit sich. Wegen des großen Gewichtes — ein Sender wiegt 250 kg — war er nur am Kran ins Wasser zu lassen. Ferner erfordert er 6 Amp. Gleichstromerregung; diese Versuche konnten also nur gemacht werden von Schiffen aus, die elektrische Maschinen an Bord hatten.

3. Meßverfahren.

Zur Durchführung der oben genannten Versuche über die Schallausbreitung waren zwei Stationen erforderlich, eine Sende- und eine Empfangsstation, von denen die eine an Land, die andere auf einem Schiff oder beide auf Schiffen untergebracht waren. Eine Station war gewöhnlich fest, d. h. sie änderte ihren Standort nicht, während die zweite Station beweglich war. Die Abstandsbestimmungen zwischen beiden Stationen wurden gemacht entweder durch Peilungen von Bord aus nach Landmarken oder einfach durch Ablaufen eines Schiffes mit konstanter bekannter Geschwindigkeit von der Gegenstation und Zeitmessung. Wo es möglich war, wurden beide Methoden kombiniert und aus den nach beiden Methoden gefundenen Werten der Mittelwert genommen. Versetzung durch Wind und Strom wurde nach Möglichkeit berücksichtigt. Die Fehler in der Entfernungsbestimmung betrugen etwa 5—10 Proz.

Da ein großer Teil der Empfangsmessungen mit Mikrophonen gemacht werden mußte, wurden zur Verminderung der Fehler sämtliche Lautstärkemessungen unter Benutzung mehrerer Empfangsapparaturen von mehreren Beobachtern,

¹⁾ Zu den späteren genauen Messungen wurden zum Teil weniger empfindliche, aber dafür etwas konstantere Mikrophone benutzt.

trotz der Ungenauigkeit der Methode und der Schwierigkeit der Messung nicht zu sehr voneinander ab.

Zum Vergleich sei auch eine Meßreihe mitgeteilt, bei der ein Sender als Empfänger diene.

Amp.	R_1	R_2	$R_1 + R_2$ 2 Amp.	
14	8540	7040	556	} Sender gesättigt
8	3540	4040	474	
4	2040	3040	635	
2	1540	2040	895	
1	840	940	890	
0,5	290	240	1080	
0,2	140	—	700	
Mittel = 759				

Die unter R_1 und R_2 mitgeteilten Zahlen bedeuten die von verschiedenen Beobachtern gemessenen Widerstandswerte, bei denen Verschwinden der Lautstärke eintrat. In der letzten Reihe sind die Mittelwerte aus beiden Messungen dividiert durch die Amperezahl enthalten.

Die beiden mitgeteilten Tabellen ergeben, daß innerhalb der Versuchsfehler sowohl beim Empfang mit Mikrofonen¹⁾ wie mit Oszillator die Lautstärke proportional der Senderstromstärke zunimmt, daß also die Lautstärke dividiert durch die Senderstromstärke für eine bestimmte Entfernung als konstant angenommen werden kann, obwohl die Senderstromstärke wie 1:70 geändert wurde. Die teils erheblichen Abweichungen vom Mittelwerte fallen ganz unregelmäßig und zeigen keine Abhängigkeit von der Stromstärke. Sie sind durch die Unsicherheit der Hörmessung bedingt.

III. Ergebnis der Versuche.

1. Abnahmegesetz.

Die ersten systematischen Untersuchungen über die Abhängigkeit der Lautstärke von der Entfernung wurden in der beschriebenen Weise am 17. und 18. Mai 1915 in der Eckern-

1) Die oben mitgeteilte Abweichung der Mikrophone von der Proportionalität wurde hier zum Teil dadurch kompensiert, daß der Sender bei 14 und 8 Ampere schon etwas übersättigt war.

förder Bucht angestellt. Der Abstand wurde etwa von Kilometer zu Kilometer geändert.

In den folgenden Tabellen sei der Anschaulichkeit wegen eine vollständige Meßreihe mitgeteilt. Die Tabellen a bis h enthalten die an den einzelnen Punkten gemessenen Lautstärken. Die erste Spalte jeder Tabelle enthält die Stromstärke, mit der der Sender betrieben wurde, die unter R_1 und R_2 mitgeteilten Werte bedeuten die von zwei Beobachtern mit einem Oszillator gemessenen Lautstärken. Aus je zwei zusammengehörigen Werten der von beiden Beobachtern gemessenen Lautstärken wurde der Mittelwert gebildet und durch die Amperezahl dividiert. Der so entstandene Wert ist in Spalte 4 enthalten. Die Spalten 5—7 und 8—10 geben entsprechende Messungen mit zwei Mikrophonempfängern wieder. Aus den für jeden einzelnen Punkt und für jeden Empfänger gefundenen Werten für die Lautstärke pro Ampere wurden die Mittelwerte gebildet.

18. Mai 1915 9—12 Uhr vormittags 2 Versuchsreihen.

R = Vorschaltwiderstand + 40 Ohm.

P = Parallelwiderstand $\cdot L = \frac{L_1 + L_2}{2}$.

$L_1 = 1 + \frac{1000}{P_1}$, $L_2 = 1 + \frac{1000}{P_2}$

a) Entfernung 0,93 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	10040	—	717	3	—	24	3	—	24
8	5040	—	630	4	—	31	8	—	16
4	4040	—	1010	5	—	50	4	—	62
2	2040	—	1030	10	—	50	40	—	12
1	1040	—	1040	16	—	66	70	—	14
0,5	640	—	1280	500	—	6	K. E.	—	(2)
0,2	440	—	2200	200	—	30	„	—	(5)
Mittel = 1142				Mittel = 37			Mittel = 26		

b) Entfernung 2,16 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	8540	7040	556	10	7	9	15	15	5
8	3540	4040	474	10	8	14	20	20	6
4	2040	3040	635	30	30	8	50	40	5,5
2	1540	2040	895	40	40	12,5	50	70	8,3
1	840	940	890	50	80	15	300	120	6,5
0,5	290	240	1060	200	300	10	10000 (?)	—	2 (?)
0,2	140	—	700						
Mittel = 759				Mittel = 11			Mittel = 6,5		

c) Entfernung 3,24 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	3540	5040	307	20	20	4	40	30	2,1
8	2040	2040	255	40	30	3,7	40	30	3,7
4	940	1040	247	60(?)	—(?)	4	50	50	5,2
2	540	790	333	40	60	10	300	80	4,2
1	290	440	365	1000	100	6,5	—	1000	2
0,5	—	240	480	—	1000	4	—	—	—
0,2	—	(?)	—	—	10000	5,5	—	—	—
Mittel = 331				Mittel = 5,4			Mittel = 3,4		

d) Entfernung 4,07 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	2040	2540	163	20	15	4,1	20	20	4
8	1040	1040	130	30	30	4	40	30	3,7
4	440	—	110	30	80	5,5	40	90	5
2	540	—	270	100	90	5,7	200	150	3,4
1	240	—	240	1000	—	2	—	—	—
0,5	40	—	88						
0,2	—	—	—						
Mittel = 165				Mittel = 4,2			Mittel = 4,02		

e) Entfernung 4,99 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	1040	1040	74	20	20	3,6	80	40	2
8	640	440	67,5	50	60	2,3	100	80	1,5
4	190	240	17,5	200	200	1,5	200	300	1,2
2	40	40	20	300	500	1,8	250	600	1,9
1	140	—	140	1000	—	2	—	—	—
0,5	—	—	—	10000	—	2	—	7 (?)	—
Mittel = 63,8			Mittel = 2,2			Mittel = 1,6			

f) Entfernung 6,18 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	240	240	17	100	100	0,8	200	200	0,5
8	40	40	5	—	200	0,75	10000	300	0,3
4	—	—	—	1000	300	0,8	1000	300	0,8
2	—	—	—	—	1000	1	10000	300	1,8
Mittel = 11			Mittel = 0,8			Mittel = 0,7			

g) Entfernung 7,12 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	40	80	4	150	150	0,5	300	200	0,3
8	40	—	5	300	400	0,49	300	500	0,46
4	—	—	—	500 (?)	600	0,7	500	500	0,75
Mittel = 4,5			Mittel = 0,5			Mittel = 0,5			

h) Entfernung 7,96 km.

Amp.	Oszillator			G-Empfänger			M-Empfänger		
	R_1	R_2	$\frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$	P_1	P_2	$\frac{L}{\text{Amp.}}$
14	—	—	—	500	—	0,2	500	—	0,2
8	—	—	—	500	10000	0,25	500	10000	0,25
4	—	—	—	10000	—	0,27	—	—	—
Mittel = 0,25			Mittel = 0,23						

i) Zusammenstellung der Lautstärken pro 1 Amp.

Für den Oszillator ist $L/\text{Amp.} = \frac{1}{40} \frac{R_1 + R_2}{2 \text{ Amp.}}$ gesetzt.

km	Oszillator	G-Empfänger	M-Empfänger	$\frac{OE + ME}{2}$
0,93	28,5	37	28	31
2,16	19	11	6,5	9
3,24	8,2	5,4	2,4	4,4
4,07	4,1	4,2	4,0	4,1
4,99	1,6	2,2	1,6	1,9
6,18	0,28	0,8	0,7	0,8
7,12	0,11	0,5	0,5	0,5
7,96	—	0,25	0,23	0,24

Die auf diese Weise für die einzelnen Punkte gefundenen Werte sind in Tab. i zusammengestellt. Die für den Oszillator gefundenen Werte sind durch 40 zu dividieren, um „Lautstärke“ zu erhalten. In Spalte 5 der Tab. i sind die für den G-Empfänger und den M-Empfänger gefundenen Werte noch einmal zu Mittelwerten vereinigt.

Die hier mitgeteilte Tab. i und eine zweite, hier nicht mitgeteilte Versuchsreihe bilden die Grundlage für die Fig. 7. In dieser Figur ist die Abhängigkeit der Lautstärke von der Entfernung graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Entfernungen in gewöhnlichem, linearem Maßstabe, als Ordinaten die Lautstärken in logarithmischem Maßstabe dargestellt. Die an zwei verschiedenen Tagen von zwei verschiedenen Beobachtern gemessenen Werte lassen als Mittel überraschend genau einen geradlinigen Verlauf der Kurven in der Figur erkennen. Ein geradliniger Verlauf bei logarithmischem Maßstabe bedeutet aber, daß die Lautstärke auf jeden Kilometer um einen gewissen Bruchteil geschwächt wird und zwar immer um denselben Bruchteil, ganz gleich, ob man etwa von 1 auf 2 km oder von 6 auf 7 km geht. Durch diese Messungen war der sichere Beweis erbracht, daß *von quadratischer Abnahme keine Rede sein kann, die Abnahme vielmehr ein Absorptionsgesetz befolgt*, und zwar ergab sich bei diesem Versuch die sehr starke Absorption von 2,3 : 1 pro Kilometer. Beim Fort-

schreiten um je 3 km sinkt die Lautstärke also auf $1:2,3^3$, d. h. auf rund den zehnten Teil. In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis wurde beobachtet, daß zur Überbrückung von

Fig 7.

8 km 10 Ampere am Sender erforderlich waren, zur Überbrückung von 5 km nur noch 1 Ampere und für 3 km $\frac{1}{6}$ Ampere Senderstrom ausreichte. Die aufgewandte Leistung wächst quadratisch mit der Stromstärke und es waren für 8 km ein Kilowatt, für 5 km 10 Watt, für 3 km 0,4 Watt, d. h. $\frac{1}{2500}$ der Leistung für 8 km erforderlich. Für 11 km wären hier-nach 100 Kilowatt, für 14 km 10000 Kilowatt erforderlich gewesen. *Es war also als praktisch vollkommen unmöglich nach-gewiesen, selbst bei wesentlicher Verbesserung der Apparate eine irgendwie größere Reichweite zu erzielen.*

2. Einfluß der Wassertiefe.

Nach diesen ersten Versuchen herrschte zunächst große Ratlosigkeit. So geringe Reichweiten waren bis dahin noch nie beobachtet worden. Man konnte sich den Grund dieser starken Abnahme überhaupt nicht erklären und vermutete, daß die Wassertiefe oder die Beschaffenheit des Bodens vielleicht

die Schuld sein könnten. Es wurde deshalb eine Wiederholung der Versuche unter den verschiedensten Bedingungen vorgenommen.

Wir wollen zunächst die Ergebnisse einiger Versuche mitteilen, die im Juni 1915 bei verschiedenen Wassertiefen in der Danziger Bucht angestellt wurden. Da das Abnahmegesetz bereits bekannt war, wurden nur Stichproben auf 4 und 8 Seemeilen und in möglichst weiter Entfernung gemacht. Sie

Fig. 8.

wurden ausgeführt bei 12, 15, 30, 70 und 85 m Wassertiefe (Fig. 8). Die Messungen sind nicht sehr genau, lassen aber doch den Schluß zu, daß die verschiedene Wassertiefe sicher nicht die Ursache für die starke Dämpfung, die auch hier auftrat, sein konnte.

Es war schon bei den Eckernförder Versuchen beobachtet worden, daß sich die Lautstärke innerhalb einiger Minuten langsam änderte, auch wenn der Oszillator als Empfänger benutzt wurde, die Apparate also nicht die Ursache dafür sein konnten. Das trat hier in noch höherem Maße ein. Es kamen Lautstärkenunterschiede von 1:5 vor. Bei tiefem Wasser hörte man ferner oft ein langes Nachhallen wie in einer Kirche. Morsezeichen kamen dann sehr verschwommen an und waren

schwer oder gar nicht zu entziffern. Es herrschte an diesen Tagen Sonnenschein und meist glatte See. Temperaturmessungen mit einem elektrischen Thermometer ergaben in größeren Tiefen um 6 bis 8° kälteres Wasser als an der Oberfläche. Vgl. hierzu den folgenden Abschnitt.

Während also bei Wassertiefen zwischen 10 und 100 m keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Tiefen hinsichtlich der Dämpfung des Schalles festgestellt wurde, liegen die Verhältnisse anders, wenn der Schall größere Strecken flachen Wassers durchläuft.

Der obere Teil der Fig. 9 zeigt die äußeren Bedingungen des in Landnähe ausgeführten Versuches. Der Sender stand in 3 km Abstand von der Landungsbrücke. Gegeben wurde mit 517 Perioden und zwei verschiedenen Stromstärken. 3 Mikrophone wurden von einem Ruderboot aus ins Wasser gehängt. Die Lautstärke wurde wie früher angegeben gemessen, die Tiefe wurde durch Lotung festgestellt, die Entfernung an der Landungsbrücke durch Abschreiten, die Entfernungen zwischen der Landungsbrücke und der ausgelegten Markierungsboje durch Abrudern mit konstanter Geschwindigkeit nach der Zeit bestimmt. Die Zwischenwerte wurden geschätzt. Daher sind die Entfernungen nicht sehr genau, nur der Größenordnung nach richtig.

Die untere Kurve der Fig. 9 zeigt die von See her anfangs langsam, später schnell abnehmende Lautstärke.

Der Schall wird also beim Durchlaufen größerer Längen flachen Wassers sehr stark geschwächt Bei 517 Perioden, d. h. rund 3 m Wellenlänge, geht die Schalllautstärke bei einer Wassertiefe von 3 m, d. h. von einer Wellenlänge, beim Durchlaufen von 100 m auf den vierten Teil, bei 2 m Wassertiefe auf den sechzehnten Teil zurück. Bei 4 bis 5 m Wassertiefe ist die Schwächung wesentlich geringer, schätzungsweise $\frac{1}{2}$ für 100 m.

Auf 1 km Länge würde die Schwächung von 100 m Länge 10mal nacheinander eintreten. Bei 2 m Wassertiefe würde dann die Lautstärke auf $(\frac{1}{10})^{10}$, bei 3 m Wassertiefe auf $(\frac{1}{4})^{10}$, bei 4 m Wassertiefe auf $(\frac{1}{2})^{10} = \frac{1}{1000}$ geschwächt werden. Hiernach ist mit einiger Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß bei

einer Wassertiefe von über 9 m, d. h. von über 3 Wellenlängen, der Einfluß auf die Schwächung des Schalles zu vernachlässigen ist. In der Tat zeigen die vorher mitgeteilten Reichweiten-

Fig. 9.

versuche, daß zwischen 12 und 80 m Wassertiefe kein merklicher Unterschied in der Dämpfung des Schalles eintritt. Spätere Versuche ergaben meist eine Schwächung, wenn der Schall über Sandbänke laufen mußte, die weniger als 6 m Wasser hatten.

Die Tatsache, daß bei geringer Wassertiefe eine sehr starke Dämpfung eintritt, ist wohl dadurch zu erklären, daß Sandboden den Schall sehr stark dämpft und nicht durchläßt. Das wurde auch experimentell bewiesen, indem Mikrophone am Strande eingegraben wurden. Schläge gegen einen im Boden gesteckten Metallstab waren in unmittelbarer Nähe sehr laut zu hören, aber schon in einer Entfernung von wenigen Metern nicht mehr. Würde sich der Schall auch im Sandboden fortpflanzen, so müßte auch in der Nähe des Bodens im Wasser eine größere Lautstärke herrschen. Das Gegenteil ist aber der Fall, die Lautstärke ist unmittelbar am Boden geringer.

Nach verschiedenen Versuchen ist die Lautstärke unabhängig von der Tiefe, in der sich Sender oder Empfänger befinden, so lange sie nicht unmittelbar auf dem Meeresboden liegen oder von der Wasseroberfläche weniger als eine Wellenlänge entfernt sind. Wenn sich Sender oder Empfänger der Oberfläche mehr als eine Wellenlänge (bei 500 Perioden gleich 3 m) nähern, so nimmt die Lautstärke merklich ab. Direkt an der Oberfläche ist die Lautstärke Null. Bei $\frac{1}{3}$ Wellenlänge sinkt sie auf $\frac{1}{4}$ des Wertes, den sie bei 3 oder 10 m hat. Das ist theoretisch auch etwa zu erwarten, da die Mikrophone auf Druckschwankungen ansprechen, die ja in der Oberfläche Null sind. Versucht man freilich die ganze Schallausbreitung im Wasser rechnerisch darzustellen, so findet man, wenn man die Oberfläche als akustisch weich betrachtet, d. h. die Grenzbedingung Schalldruck = 0 einführt, daß in größerer Entfernung vom Sender überhaupt keine Lautstärke mehr vorhanden sein sollte.

3. Die Ursache für die Dämpfung.

Durch diese und zahlreiche spätere Versuche wurde einwandfrei festgestellt, daß lediglich der Zustand des Wassers selbst die alle Hoffnungen zerstörende starke Dämpfung des Schalles bedingen müsse. Es gelang jetzt noch, dies theoretisch zu begründen.¹⁾ Es sind die Ungleichförmigkeiten von

1) H. Lichte, Physik. Zeitschr. 11. S. 385. 1919.

Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, daß eine Dämpfung infolge innerer Reibung des Wassers nicht in Frage kommt. Rayleigh, Theorie

Temperatur und Salzgehalt, die die Schallgeschwindigkeit im Wasser fast ebenso stark beeinflussen, wie Temperatur und Wind in der Luft. Es tritt daher *erstens* bei horizontalen Schichtungen eine Krümmung der Schallstrahlen verbunden mit einer Abwanderung der Energie nach oben oder unten ein. Diese ist in Luft bekanntlich die Ursache dafür, daß man mit dem Winde viel weiter hört, als gegen den Wind. (Der Wind ist oben stets stärker als am Boden.) Im Wasser folgt daraus, daß im Sommer, wenn das Wasser oben wärmer ist als unten, die Schallenergie nach unten abwandert, im Winter entsprechend nach oben. Da nun der Boden den Schall nur wenig, die Oberfläche dagegen praktisch vollkommen reflektiert, so muß die Reichweite im Sommer kleiner sein als im Winter. Diese Folgerung fand sich durch die zahlreichen während der folgenden Jahre angestellten Versuche durchaus bestätigt.

Zweitens wird aber jede vertikale Wand verschiedener Beschaffenheit eine Reflexion oder bei unregelmäßiger Form eine Zerstreuung des Schalles bewirken. Die Verhältnisse liegen ähnlich wie beim Nebel. Die Wassertropfen sind an sich durchsichtig, aber die diffuse Zerstreuung läßt das Licht nicht durch. Wenn beim Schall auch die Inhomogenitäten wesentlich geringer sind, so muß doch eine ununterbrochene Folge solcher Unregelmäßigkeiten insgesamt eine starke Wirkung ausüben, besonders beim Wasser, wo ein Teil der zerstreuten Energie durch den nahen Boden verschluckt wird. Daß in Luft sehr starke Inhomogenitäten, wie z. B. heiße Flammenwände, den

des Schalles II. S. 368 ff., berechnet den Dämpfungskoeffizienten bei Vorhandensein von innerer Reibung

$$\alpha = \frac{8\pi^2\mu}{3\rho a^3} n^2,$$

wenn μ der Reibungskoeffizient, ρ die Dichte, a die Schallgeschwindigkeit und n die Frequenz bedeuten.

Für Wasser ist

$$\rho = 1, \quad a = 1,44 \cdot 10^5, \quad \mu = 0,01;$$

daraus berechnet sich

$$\alpha = n^2 \cdot 10^{-16},$$

und wenn wir $n = 1000$ annehmen

$$\alpha = 10^{-10};$$

d. h. es tritt eine Abnahme der Amplitude auf $1/e$, also eine Intensitätsverminderung auf fast $1/10$, erst nach 100 000 km auf.

Schall nicht durchlassen, hat Tyndall gezeigt.¹⁾ Ebenso ist das wirbelige Schraubenwasser großer Schiffe für den Unterwasserschall fast undurchlässig.

Eine Zeitlang wurden auch bei den Reichweiteversuchen Temperatur und Salzgehalt des Wassers mit elektrischen Apparaten in verschiedenen Tiefen gemessen. Fig. 10 zeigt z. B. die Abnahme der Temperatur mit der Wassertiefe im Sommer an drei verschiedenen Punkten. Die daraus rechnerisch zu folgernde Dämpfung ist noch größer als die gemessene, auch wenn man berücksichtigt, daß der nach unten hin zunehmende Salzgehalt den Temperatureinfluß zum Teil kompensiert.

Hieraus erklären sich auch die außerordentlich verschiedenen Reichweiten, die bald nur wenige Kilometer, bald über 100 km betragen. Bei einer fest verlegten Sender- und Empfangsanlage war im Sommer mit der größten Senderleistung von 300 Watt oft ein Empfang auf den 8 und sogar nur 6 km entfernten Empfängern nicht möglich, während im Winter gelegentlich eine ausgestrahlte Schalleistung von nur 0,01 Watt noch auf 15 km, dem weitesten Empfänger deutlich gehört wurde. Bei rein quadratischer Abnahme der Energie berechnet sich in diesem Falle die Schalldichte am Empfangsort zu $0,4 \cdot 10^{-15}$ Watt/cm². Da dieser Schalldichte tatsächlich etwa die Grenzlautstärke der Mikrophone entspricht, wie im II. Abschnitt angegeben, muß hier die Dämpfung ganz verschwingend gewesen sein, wenn nicht durch die obere und

Fig. 10.

1) J. Tyndall, On Sound. 4. Aufl. 1883.

untere enge Begrenzung des Wassers ein anderes Ausbreitungsgesetz als das quadratische bestanden hat (Sprachrohrwirkung).

Bei quadratischer Ausbreitung würde ein 1-Kilowatt-Sender noch in 1000 km Abstand eine Schalldichte von 10^{-14} Watt/cm² erzeugen. Ohne Dämpfung könnte man also Reichweiten von weit über 1000 km erwarten! Normalerweise herrscht aber ein so starker „Nebel“, daß die Reichweite kaum 10 bis 20 km beträgt.

Wenn, wie bei den anfangs aufgestellten Versuchen, die Dämpfung des Wassers quantitativ festgestellt wird, so kann man diese mit in Rechnung setzen und bei bekannter Senderleistung die Schalldichte für jede Entfernung ausrechnen. Tut man dies für die größte Reichweite, bei der mit Mikrophonen noch Zeichen hörbar waren, so erhält man immer eine Schalldichte von der Größenordnung 10^{-15} Watt/cm² in guter Übereinstimmung mit der im II. Abschnitt mitgeteilten absoluten Eichung der Empfänger.

4. Örtliche Einflüsse.

Wenn die Verteilung von Temperatur und Salzgehalt einen so starken Einfluß hat, wird es auch verständlich, daß die Reichweiten in nahe beieinander liegenden Gegenden stark schwanken können. Mit genau denselben Apparaten und genau denselben Anordnungen war z. B. bei einem Versuch, der sich in nordöstlicher Richtung von Boje Mittelgrund A (westliche Ostsee) erstreckte (am 23. Juli 1915) schon auf 2 km kein Empfang mehr möglich, während bei einem Versuch, der am nächsten Tage von Boje Kiel-Leuchtfener in nördlicher Richtung sich erstreckte, auf 15 km noch gut empfangen wurde und auf 9 km noch eine sehr große Lautstärke herrschte. Bei dem zweiten Versuch nahm die Lautstärke bis 9 km etwa proportional der Entfernung ab, d. h. so, als ob überhaupt keine dämpfende Wirkung vorhanden sei. Von 9 km ab setzte aber eine nicht unerhebliche Dämpfung ein, so daß bei 15 km schon wesentlich schwächerer und bei 20 km gar kein Empfang mehr war. Im allgemeinen wurden frei von Küsten und Sandbänken größere Reichweiten erzielt, als in engen Buchten. Der Grund dafür ist sicher in der gleichmäßigeren Temperatur oder wenigstens in der gleichmäßigeren Schichtung der Temperatur im freien Wasser zu suchen. In Küstengegenden stauen sich

gerade die Strömungen und werden besonders stark. Insbesondere tritt hier Wirbelbildung ein, während im freien Wasser mehr Potentialströmung herrscht. Der Schall wird daher diffus zerstreut und vom Boden absorbiert. Gelegentlich wurde freilich auch beobachtet, daß in Landnähe die Reichweiten größer waren als in größeren Abständen von Land. Besonders ungünstig müssen hiernach die Flußmündungen sein, zumal hier auch noch der verschiedene Salzgehalt hinzukommt.

5. Einfluß der Frequenz.

Ungleichförmigkeiten im Wasser müssen vom Schall um so leichter überwunden werden, je größer die Wellenlänge, je tiefer also die Frequenz ist. Umgekehrt muß der ungünstige Einfluß zu geringer Wassertiefe gerade bei den langen Wellen zuerst hervortreten. Es war daher auf alle Fälle wichtig, den Einfluß der Frequenz auf die Ausbreitung zu untersuchen, zumal eine andere Frequenz die einzige Möglichkeit bot, die Dämpfung des Wassers und damit die Reichweite zu ändern. Es schien zunächst einmal wichtig, mit leicht zu beschaffenden Mitteln zu untersuchen, ob irgendein Gang der Reichweite mit der Frequenz bestehe. Es stand hierzu ein elektromagnetischer Sender für 1000 Perioden und ein solcher für 230 Perioden und ferner eine Sirene zur Verfügung. Letztere wurde durch einen besonderen Elektromotor in Umdrehungen versetzt, so daß man durch Ändern der Tourenzahl Tönhöhen von 1500 bis 2500 Schwingungen pro Sekunde einstellen konnte. Außerdem konnte auf der Empfangsseite durch Einschalten eines elektrischen Schwingungskreises vor das Telephon auf die Grund- und Obertöne der Sirene abgestimmt werden, so daß die Abnahme der Lautstärke für beide gleichzeitig gemessen werden konnte. Die Mikrophonempfänger waren für die tiefen und die hohen Frequenzen wesentlich weniger empfindlich. Doch war dies nicht von Bedeutung, da ja das Abnahmegesetz, nicht die Reichweite festgestellt werden sollte. Die elektromagnetischen Sender wurden wieder mit verschiedenen Stromstärken betrieben. Bei der Sirene war eine quantitativ meßbare Abschwächung nicht möglich, so daß sie nur mit voller Lautstärke benutzt wurde. Der Druck des Betriebswassers wurde genau konstant gehalten.

Für eine Versuchsreihe sind die Werte in Fig. 11 zusammengestellt. Abszissen und Ordinaten sind gewählt wie bei den früheren Kurven. Die Neigung der Linien, die die Größe der Dämpfung darstellen, sind bei allen Kurven im wesentlichen dieselben, zeigen insbesondere keinen Gang mit der Frequenz.

Fig. 11.

Die mittlere Frequenz 1500 erscheint (zufällig) am wenigsten gedämpft. Ein wesentlicher Vorteil der höheren Frequenzen bestand dagegen für die praktische Anwendung darin, daß sie durch Störungen aller Art wesentlich besser hindurchgehört werden.

Es wurden später auch Versuche mit ganz tiefen, direkt kaum hörbaren Frequenzen (50 Perioden pro Sekunde) gemacht.

Aus theoretischen Überlegungen sollte man für diese eine geringere Dämpfung erwarten. Auch pflanzen sich ganz langsame Schwingungen ja durch den Erdboden sehr weit fort, wie man an den Erdbebenwellen und den Aufzeichnungen von Maschinenerschütterungen durch die Seismographen erkennen kann. — Die praktischen Schwierigkeiten erwiesen sich aber als recht groß. Die eigens hierfür gebauten elektromagnetischen Sender strahlten nur geringe Leistung, etwa 10 Watt, aus. Die Mikrophonempfänger sind für diese tiefen Perioden sehr unempfindlich. Es wurde daher ein zweiter Sender als elektromagnetischer Empfänger benutzt. Der Ton selbst wurde durch besondere Mittel, die hier nicht näher angegeben werden können, hörbar gemacht. Neben den Tönen hatte man enorme Störungen durch den geringsten Seegang oder irgendeine Bewegung im Schiff, daher erzielte man nur Reichweiten von etwa 1 km. Innerhalb der Fehlergrenze war die Abnahme quadratisch, damit ist aber nicht gesagt, daß keine Dämpfung vorhanden ist, denn eine nicht übermäßig große Dämpfung tritt erst bei größerer Entfernung merklich in Erscheinung. Wegen der praktischen Schwierigkeiten konnten die Versuche nicht zu Ende geführt werden.

Zusammenfassung.

1. Die von einem elektromagnetischen Sender tatsächlich akustisch ausgestrahlte Leistung wurde bis auf etwa 10 Proz. genau bestimmt.

2. Die Grenzlautstärke von Unterwassermikrophonen entspricht etwa einer Schalldichte von 10^{-15} Watt/cm².

3. Die Ausbreitung des Schalles auf große Entfernungen erfolgt (wie in der Luft) nicht nach dem Gesetz des Quadrates der Entfernungen, sondern nach einem Dämpfungsgesetz, d. h. die Lautstärke sinkt immer auf einen bestimmten Bruchteil, wenn man um eine bestimmte Strecke weitergeht.

4. Die Ursache hierfür sind (wie in der Luft) akustische Ungleichförmigkeiten, insbesondere eine unregelmäßige Temperaturverteilung.

5. Die Folgerung hieraus, daß die Reichweite des Unterwasserschalls im Sommer im allgemeinen wesentlich geringer ist als im Winter, wird durch die Versuche bestätigt.

6. Die normalen Reichweiten in der freien Ostsee betrugen im Sommer etwa 10 km, im Winter 20 km. In der Nähe der Küsten waren sie geringer. Gelegentlich wurden mit denselben Apparaten nur 2 km, anderseits über 100 km erreicht; bei quadratischer Ausbreitung ohne Dämpfung würde sich eine Reichweite von über 1000 km ergeben.

7. Die Größe der Dämpfung ist innerhalb der hörbaren Frequenzen unabhängig von der Frequenz. Für ganz tiefe Frequenzen konnten die Versuche wegen der praktischen Schwierigkeiten nicht zum Abschluß gebracht werden.

8. Aus dem Dämpfungsgesetz folgt, daß eine Verbesserung der Apparate nur einen unwesentlichen Einfluß auf die Reichweite haben kann. Diese ist vielmehr praktisch nur von dem Zustande des Wassers abhängig.

Dresden und Kiel, Dezember 1919.

(Eingegangen 16. Januar 1920.)