Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 40 (1967)

Heft: 9

Artikel: Wellenausbreitung im Süsswasser

Autor: Dessoulavy, Roger / Hunkeler, Adrian

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-562776

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Wellenausbreitung im Süsswasser

1. Einleitung

Es ist wohl bekannt, dass die Radioverbindungen mit Unterseebooten während des Tauchens im Meer mit sehr langen Wellen (Frequenzen von 10...30 kHz) bewerkstelligt werden, weil die Dämpfung mit der Frequenz beträchtlich ansteigt. Es erweist sich meistens als günstiger, die Verbindungen mit Tauchbooten oder zwischen solchen mit Ultraschall auszuführen, dessen Reichweite erheblich grösser ist, und dessen Strahlung man in Bündel zusammenfassen kann.

Die Ursache der Abschwächung der elektromagnetischen Wellen im Wasser erklärt sich aus der Leitfähigkeit des Mediums, in dem sich die Wellen ausbreiten. In der Luft, die ein Isolator ist, erzeugt das elektrische Feld der Welle keinen Leitungsstrom; alle Energie der Welle bleibt im Verlaufe der Ausbreitung erhalten. Im Wasser dagegen fliessen umso grössere Ströme, je höher die Leitfähigkeit ist; sie entziehen der Welle die Energie, die notwendig ist, um die Wirkstromverluste zu decken, was die Abschwächung der Welle erklärt.

Die im Meerwasser gelösten Salze verleihen diesem eine Leitfähigkeit, die mindestens hundertmal grösser ist als jene des Süsswassers. Man darf also erwarten, für Süsswasser eine erheblich schwächere Dämpfung der Radiowellen zu erhalten als im Meer.

Die einzigartige Gelegenheit, die sich dank der Anwesenheit des Mesoscaphs im Genfersee bot, bewog uns, diese Eigenschaften experimentell nachzuprüfen, was unseres Wissens bisher noch nie versucht worden ist. Die Messungen liessen sich Anfang 1965 im Rahmen einer Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen gut verwirklichen. Diese betrafen verschiedene Gebiete (Gewässerverschmutzung, Gravimetrie, Geologie usw.) und wurden dadurch ermöglicht, dass die Direktion der Schweizerischen Landesausstellung 1964 (Expo) ihr Tauchboot «Mesoscaph» dazu zur Verfügung stellte.

2. Berechnung der Abschwächung der Wellen

Die Maxwellschen Gleichungen gestatten die Ausbreitungsbedingungen der Wellen in einem Medium einfach zu berechnen, das durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet ist:

$\mu = \mu_r \mu_0$	Permeabilität
$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$	Permittivität
σ	Leitfähigkeit

Im Falle des Wassers:

$$\mu_r = 1, \text{ woraus } \mu = \mu_0 = 0{,}4\,\pi\,10^{-6}\,\mathrm{H/m}$$

$$\varepsilon_r \simeq 81, \text{ woraus } \varepsilon \simeq \frac{81 \cdot 10^{-9}}{36\,\pi} = \frac{9 \cdot 10^{-9}}{4\,\pi}\,\mathrm{F/m}$$

$$\sigma \simeq 4{,}6\,\Omega^{-1}\,\mathrm{m}^{-1} \text{ für Salzwasser}$$

$\sigma \simeq 16{,}2 \cdot 10^{-3}\,\Omega^{-1}\,\mathrm{m}^{-1}$ für Süsswasser bei etwa 5 °C, im Verlaufe der Tauchfahrten gemessener Wert.

Es ist zu bemerken, dass sich die Leitfähigkeit mit der Temperatur ändert (Anstieg von ungefähr 2 % je °C).

Erinnern wir daran, dass der Übertragungsbelag der Ausbreitung einer ebenen Welle aus den oben aufgeführten Werten und der Frequenz f abgeleitet werden kann:

$$\bar{\gamma} = \alpha + \mathrm{j}\,\beta = \sqrt{\mathrm{j}\,\omega\,\mu\,(\sigma + \mathrm{j}\,\omega\,\varepsilon)} \qquad (1)$$

wobei

$\alpha = \mathrm{Re}\,\{\bar{\gamma}\}$	Dämpfungsbelag	in N/m
$\beta = \mathrm{Im}\,\{\bar{\gamma}\}$	Phasenbelag	in rad/m
$\omega = 2\,\pi f$	Kreisfrequenz	in s^{-1}
f	Frequenz	in Hz

Wir interessieren uns besonders für den Wert des Dämpfungsbelags a, der den exponentiellen Abfall der Intensität der elektrischen und magnetischen Felder mit der Entfernung, hier der Tiefe unterhalb der Oberfläche, beschreibt.

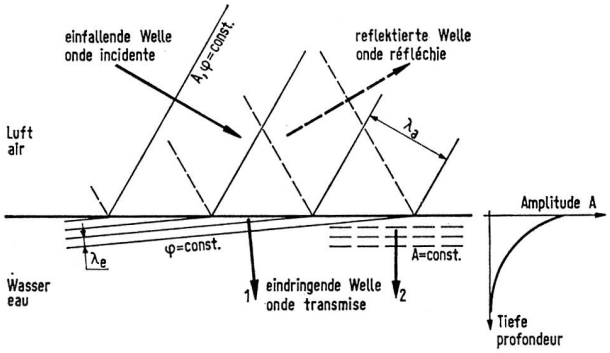

Fig. 1
λ_a = Wellenlänge in der Luft
λ_e = Wellenlänge im Wasser

Die exakte Untersuchung des Problems der Übertragung ebener Wellen, die von einem fernen Sender stammen und unter einem bestimmten Winkel auf die Wasserfläche auftreffen, ist verhältnismässig kompliziert. Der grösste Teil der Welle wird reflektiert, und nur ein kleiner Bruchteil dringt in das Wasser ein. Die so übermittelte Welle ist gekennzeichnet durch bestimmte Ebenen konstanter Phase und Amplitude. Während sich die Welle entsprechend den Brechungsgesetzen anscheinend schräg fortpflanzt, ändert sich deren Amplitude in der Vertikalen, wie dies Figur 1 darstellt. Die Berechnung zeigt, dass die Abschwächung mit der Tiefe praktisch dieselbe ist wie jene einer Welle mit senkrechtem Einfall (Fig. 2). Dies erleichtert in der Folge die Rechnungen

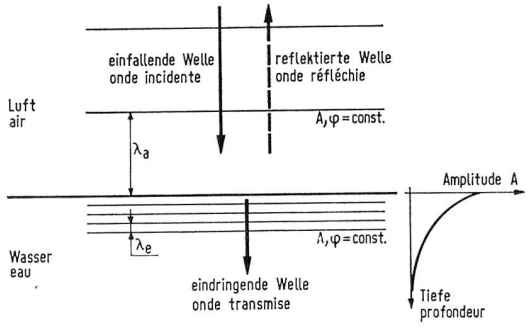

Fig. 2
λ_a = Wellenlänge in der Luft
λ_e = Wellenlänge im Wasser

wesentlich. Man kann somit den Dämpfungsbelag unmittelbar aus der Gleichung (1) ableiten:

$$\alpha = \mathrm{Re}\{\overline{\gamma}\} = \mathrm{Re}\{\sqrt{\mathrm{j}\,\omega\,\mu\,(\sigma + \mathrm{j}\,\omega\,\varepsilon)}\} \qquad (2)$$

Es sind zwei Grenzfälle ins Auge zu fassen, die einfache Ergebnisse liefern.

Relativ tiefe Frequenzen

Für genügend tiefe Frequenzen, bei denen

$$\omega\,\varepsilon \ll \sigma$$

ist, ergibt die Gleichung (2)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\,\mu\,\sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \qquad (3)$$

Das ist der Fall bei einem Medium, das man als «guten Leiter» bezeichnet. Man stellt fest, dass es vorteilhaft ist, möglichst tiefe Frequenzen zu verwenden, um eine schwache Dämpfung zu erhalten.

Im übrigen ist die Wellenlänge durch den Wert von ß gekennzeichnet, der derselbe ist wie a:

$$\beta = \frac{2\,\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \sqrt{\frac{\omega\,\mu\,\sigma}{2}} \qquad (4)$$

Die Schnelligkeit v der Wellen ist also viel kleiner als in der Luft.

Relativ hohe Frequenzen

Für Frequenzen, bei denen

$$\omega\,\varepsilon \gg \sigma$$

ergibt die Gleichung (2)

$$\alpha = \alpha_{\max} = \frac{1}{2}\,\sigma\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \qquad (5)$$

Das ist der obere Grenzwert des Dämpfungsbelages, der nun unabhängig von der Frequenz ist, sofern σ, μ und ε von ihr unabhängig sind. Dies entspricht einem Medium mit schwachen Verlusten je Wellenlänge. Als Anhaltspunkt berechnen wir diesen Dämpfungsbelag für Salz- und Süsswasser mit den vorstehend angegebenen Zahlenwerten

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} 97\ \mathrm{N/m}\ (840\ \mathrm{dB/m})\ \text{im Salzwasser} \\ 0{,}34\ \mathrm{N/m}\ (2{,}95\ \mathrm{dB/m})\ \text{im Süsswasser} \end{cases}$$

Die Vatiation des Dämpfungsbelags für einen ausgedehnten Frequenzbereich ist in Figur 3 dargestellt.

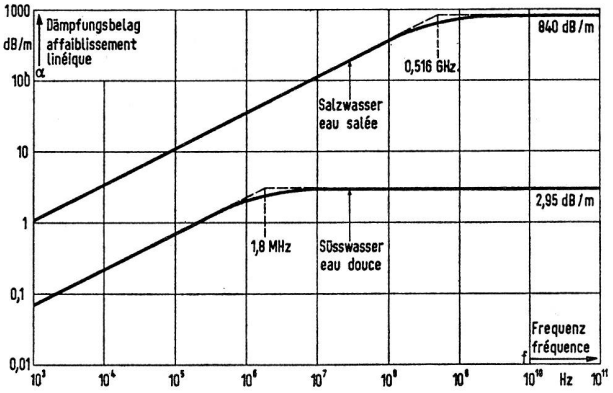

Fig. 3
Dämpfungsbelag α in Funktion der Frequenz f

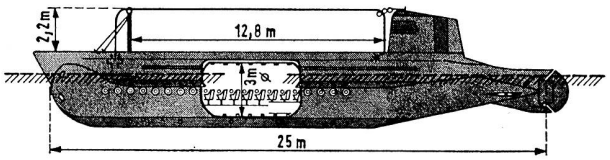

Fig. 4
Mesoscaph mit Rahmenantenne

3. Messverfahren

Bei der Vorbereitung der Messreihe zeigte sich, dass im Frequenzbereich 16...1000 kHz verschiedene starke Signale einfielen, deren Feldstärken im Laufe des Tages wenig änderten. Aus diesem Grunde erübrigte sich ein eigener Sender, und man stellt für den Mesoscaph eine Empfangsanlage bereit, wie sie in den Figuren 4 und 5 schematisch dargestellt ist. Diese bestand im wesentlichen aus folgenden Teilen:

— Rahmenantenne, ausgespannter isolierter Leiter, Schiffsrumpf teilweise in den Rahmenkreis einbezogen;
— einstellbarer Kondensator, ergibt zusammen mit der Rahmeninduktivität einen Parallel-Schwingkreis;
— Empfänger Siemens E 566, Regelspannung als Mass der HF-Spannung herausgeführt auf
— Gleichspannungsverstärker Keithley, Modell 610
— Tintenschreiber Esterline 1mA zur Registrierung der HF-Spannung in Funktion der Tiefe.

Grundsätzlich hätte auch eine auf das elektrische Feld ansprechende Antenne dienen können. Die Rahmenantenne liess sich jedoch auf den gewählten Frequenzen mit einfachen Mitteln auf den hochohmigen Empfängereingang anpassen. Die druckdichte Koaxialkabel-Durchführung wurde

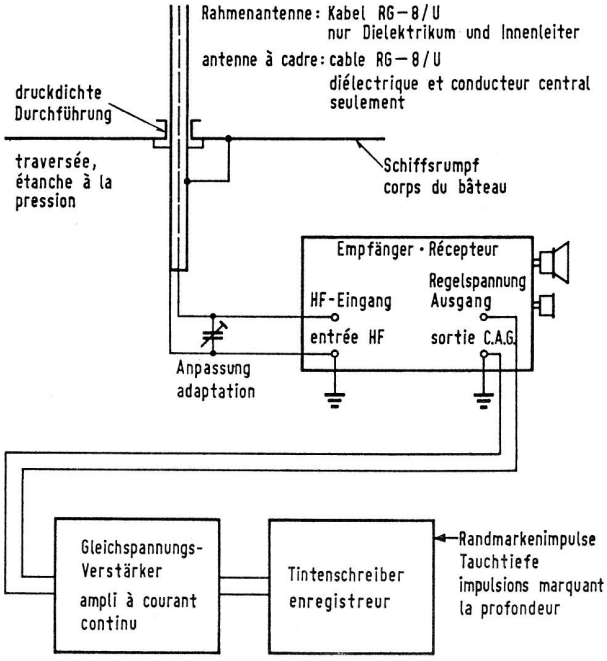

Fig. 5
Blockschema der Empfangsanlage

von der Expo entworfen und von der Ecole polytechnique der Universität Lausanne (EPUL) ausgeführt.
Für die Messungen dienten nachstehend verzeichnete Telegraphie- und Rundspruchsender. Die Feldstärke dieser Sender wurde auf dem Begleitboot an der Oberfläche über der Eintauchstelle ermittelt:

Sender	Rugby England	Loran C Spanien	Europe I Saarland	Sottens
Frequenz	16	100	180	764 kHz
Leistung	250	100	400	150 kW
Distanz	860	≈ 700	290	22 km
Azimut	320	≈ 240	5	32 °
Feldstärke	2,2	1,6	11,2	112 m V/m

4. Messergebnisse

Im Interesse möglichst stabiler, störungsfreier Messbedingungen wurde das statische Tauchen und Aufsteigen des Schiffes mit konstantem Azimut und kleiner Vorwärtsbewegung angewendet. Anlässlich der verschiedenen Fahrten wurde der Verlauf der HF-Amplitude registriert. Die Mittelwerte dieser Messreihen sind in Figur 6 dargestellt.

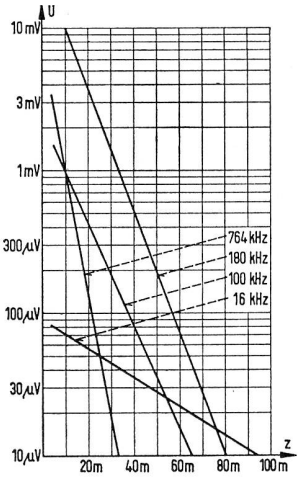

Fig. 6
Empfangene HF-Spannung U in Funktion der Tauchtiefe z

Durch Anwenden eines logarithmischen Maßstabes für die HF-Spannung U wird die exponentielle Abnahme dieser Grösse mit zunehmender Tiefe z (Mitte der Rahmenantenne) klar ersichtlich. Die Frequenz-Abhängigkeit des Dämpfungsbelags äussert sich in der unterschiedlichen Steilheit der Geraden. Es ist nun möglich, den gemessenen Dämpfungsbelag anzugeben und ihn mit dem berechneten (Fig. 3) zu vergleichen. Diese Tabelle enthält ferner den relativen Fehler r unserer Beobachtungen.

Frequenz	f	16	100	180	764 kHz
relat. Fehler	r	±12	±9,4	±7,0	±11 %
α gemessen		0,20	0,71	0,90	1,75 dB/m
α berechnet		0,29	0,71	0,95	1,84 dB/m

Diese Gegenüberstellung zeigt ein gutes Übereinstimmen von Theorie und Messung.
Zur Abrundung des Bildes seien im folgenden noch einige weitere Ergebnisse angedeutet: Das Drehen des Bootes unter Wasser ermöglichte eine Aussage über die Richtwirkung unserer Rahmenantenne. Bei diesem Peilversuch ergaben sich die erwarteten Azimutzahlen der einfallenden Sender. Für die Frequenzen 16 beziehungsweise 100 kHz betrug das Verhältnis der Maxima und Minima der Empfangsspannung 16 beziehungsweise 13 dB in einer Tiefe von 10 m. Es besteht somit auch für die Peilschärfe ein Vorzug hinsichtlich der tiefen Frequenzen. Bezüglich der Rahmenkreisgüte in der Luft oder im Wasser lag bei 16 kHz praktisch kein Unterschied vor, wogegen dieser Wert im zweiten Fall bei höheren Frequenzen etwa auf die Hälfte abfiel.
Abschliessend sei darauf hingewiesen, dass die Empfangsmöglichkeiten unter Wasser durch die Eigenschaften der Anlage sowie durch den Nutzsignal- und Störpegel gegeben sind. Es war mit nicht besonders hochgezüchtetem Material möglich, Telegraphiezeichen auf 16 kHz bis zu 100 m Tauchtiefe aufzunehmen.

Roger Dessoulavy, Lausanne
Adrian Hunkeler, Bern