

# Elektrische Impedanzspektroskopie als Defektindikator für passive Hydrophone

Adrian May<sup>1,2</sup>, Robert Kühler<sup>2</sup>, Michael Bellmann<sup>2</sup>, Rainer Matuschek<sup>2</sup>, Matthias Blau<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Hörtechnik und Audiologie, Jade Hochschule Oldenburg

<sup>2</sup> itap GmbH, 26129 Oldenburg, Email: info@itap.de <sup>3</sup> Exzellenzcluster „Hearing4All“

## Einleitung

Bei akustischen Langzeitmessungen unter Wasser sind Hydrophone verschiedenen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Dazu gehören insbesondere Wellen und Strömungen sowie das Ausbringen und Einholen.

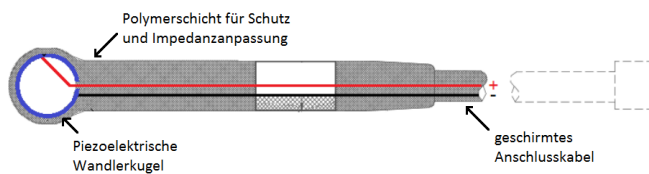
Vereinzelte fallen nach Langzeitmessungen Hydrophone auf, die ein eingeschränktes Schallempfängerverhalten in Form von zu leisen Pegeln aufweisen. Zwar ist nach einer solchen Überprüfung bekannt, dass sich der Schallwandler auffällig verhält. Jedoch liegt keine Erkenntnis über die Ursache dieser Auffälligkeit vor. Defekte an den betroffenen Wandlern können daher nicht ausgeschlossen werden.

Die Defektdetektion an piezoelektrischen Wandlern ist ausgiebig erforscht. Piezoelektrische Wandler mit künstlich evozierten Oberflächenschäden wurden bereits in vorhergehenden Studien erfolgreich detektiert [1] [2]. Jedoch gibt es bisher noch keine Forschung zur Charakterisierung von Defekten, die bei Langzeiteinsätzen unter Wasser entstehen.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Apparatur zur Messung der elektrischen Eingangsimpedanz der Hydrophone, um Defekte zu detektieren. Darüber hinaus wurden a.) auffällige und unauffällige Hydrophone mit diesem System vermessen und b.) eine Charakterisierung der detektierten Auffälligkeiten diskutiert.

## Untersuchte Hydrophone

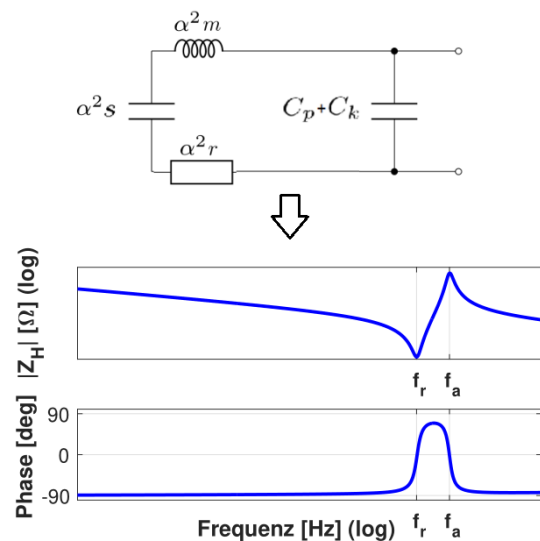
In dieser Arbeit wurden Hydrophone des Typs TC-4033 (Hersteller Teledyne Reson) untersucht. Hierbei handelt es sich um piezoelektrische Kugelwandler, welche mit einer Polymerbeschichtung zur Impedanzanpassung an Wasser und zum Schutz der Piezokugel versehen sind (Abbildung 1). Ein dem Hydrophonmodell entsprechendes elek-



**Abbildung 1:** Aufbau der in dieser Arbeit vermessenen Hydrophone Modell TC-4033, Hersteller Teledyne Reson (Bild abgewandelt nach [4]).

troakustisches Ersatzschaltbild sowie dessen theoretische Eingangsimpedanz findet sich in Abbildung 2. Hierbei sei zu erwähnen, dass alle Eingangsimpedanzen dieser Arbeit in der Lastbedingung Luft vermessen werden. Aufgrund des hohen Impedanzsprungs zwischen Luft und Polymerschicht wird für die akustische Lastbedingung ein Kurzschluss angenommen (d.h.  $\hat{p} = 0$ ).

Der tieffrequente Bereich unterhalb der Resonanzfrequenz  $f_r$  ist hauptsächlich durch die Federsteife  $s$  des Piezowandlers sowie der kombinierten Kabel- und Piezokapazität ( $C_k, C_p$ ) definiert. Die Resonanzfrequenz ist durch die mit  $\alpha$  gewichtete Mechanik der Piezokugel (Federsteife  $s$  und Masse  $m$ ) bestimmt. Erfahrungsgemäß fällt die Resonanzfrequenz der Modelle TC-4033 in den Frequenzbereich zwischen 80 kHz und 100 kHz.



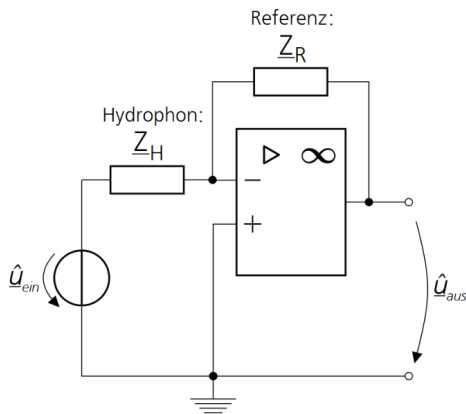
**Abbildung 2:** Oben: Elektroakustisches Ersatzschaltbild des Hydrophonmodells TC-4033, Hersteller Teledyne Reson, unter Annahme eines Kurzschlusses für die akustische Lastbedingung aufgrund des hohen Impedanzsprungs zwischen Luft und Polymerbeschichtung.  $\alpha$  setzt sich aus den geometrischen Abmessungen und Materialeigenschaften der piezoelektrischen Struktur zusammen. Unten: Theoretische frequenzabhängige Eingangsimpedanz nach obigem Ersatzschaltbild.

## Entwickelte Messapparatur

Die grundlegende Funktionsweise der in dieser Arbeit entwickelten Messapparatur basiert auf dem Vergleich der zunächst unbekanntes Impedanz des Hydrophons  $\underline{Z}_H$  mit einer bekannten Referenzimpedanz  $\underline{Z}_R$ . Dieser Vergleich erfolgt über eine invertierende Verstärkerschaltung nach Abbildung 3.

Der Verstärkungsfaktor ( $\hat{u}_{aus}/\hat{u}_{ein}$ ) der Schaltung entspricht im Falle eines idealen Operationsverstärkers dem Verhältnis von  $-\underline{Z}_H$  zu  $\underline{Z}_R$ . Nach Umstellung zur unbekanntes Impedanz  $\underline{Z}_H$  lässt sich erkennen, dass diese sich mittels einer mit  $-\underline{Z}_R$  gewichteten Übertragungsfunktion messen lässt (vgl. Formel 1).

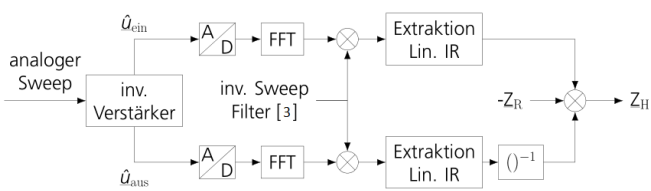
$$\underline{Z}_H = -\underline{Z}_R \cdot \frac{\hat{u}_{ein}}{\hat{u}_{aus}} \quad [\Omega] \quad (1)$$



**Abbildung 3:** Grundlegende Funktionsweise der in dieser Arbeit entwickelten Schaltung zur Messung der elektrischen Eingangsimpedanz  $Z_H$  auf Basis einer invertierenden Verstärkerschaltung. Zur Messung von  $Z_H$  muss neben  $\hat{u}_{ein}$  und  $\hat{u}_{aus}$  auch die Impedanz des Referenzbauteils  $Z_R$  bekannt und möglichst genau sein.

Große Unterschiede zwischen dem kapazitiv dominierten Hydrophon und  $Z_R$  führen zu großen bzw. kleinen Ausgangsspannungen des Operationsverstärkers (OPV). Um Clipping des OPV bzw. Aufnahme von Messrauschen zu vermeiden, wurde  $Z_R$  deshalb ebenfalls kapazitiv entworfen.

Die AD-Wandlung von  $\hat{u}_{ein}$  und  $\hat{u}_{aus}$  erfolgte über das 14-Bit USB-Oszilloskop „Handyscope HS5-055XM“. Auch die DA-Wandlung des Eingangssignals fand über das Oszilloskop und dessen „AWG“-Ausgang statt. Als Eingangssignal diente ein exponentieller Sweep [3]. Nach Messung der Übertragungsfunktion wurde dessen linearer Anteil durch Entfernung von Impulsantwortkomponenten im negativen Zeitbereich extrahiert. Eine Übersicht des gesamten Messablaufs findet sich in Abbildung 4.



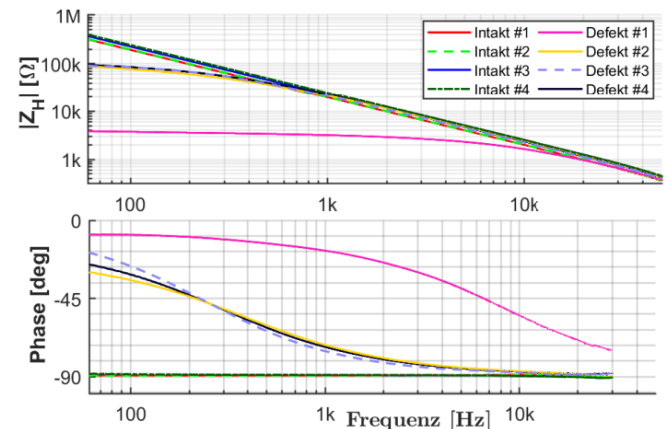
**Abbildung 4:** Blockschaltbild der Funktionsweise der entwickelten Messapparatur zur Messung von Impedanzspektren.

## Vergleich defekter und intakter Hydrophone

Es wurden insgesamt acht Hydrophone mit der entwickelten Messapparatur vermessen, von denen vier auffällig geringe Ausgangspegel nach einem Langzeiteinsatz aufwiesen (im Folgenden „Defekt“). Die weiteren vier Modelle zeigten keine Auffälligkeit im Empfangsverhalten (im Folgenden „Intakt“).

Bei allen Hydrophonen erfüllte die Impedanz im Frequenzbereich der Resonanz- und Antiresonanzfrequenzen

die Erwartungen an das elektroakustische Ersatzschaltbild nach Abbildung 2. Daher wird in Abbildung 5 und 7 lediglich der Bereich unterhalb der Resonanzfrequenz zwischen 60 Hz und 50 kHz dargestellt.



**Abbildung 5:** Absolute Impedanzspektren (oben) und Phasenimpedanzspektren (unten) von acht Hydrophonen des Herstellers Reson (Modell TC-4033). Gemessen im unbelasteten Zustand in Luft. Vier der Geräte (Defekt #1 bis #4) wurden nach Einsätzen in der Nordsee aufgrund erheblicher Abweichungen zu den erwarteten Spannungspegeln ausgemustert. Ein Defekt war bei diesen Modellen nicht auszuschließen. Die restlichen Modelle wiesen keine Auffälligkeiten auf.

Die Impedanzen intakter Modelle fielen im Betrag zu den hohen Frequenzen hin invers proportional zur Frequenz ab. Die Phase betrug über das gesamte betrachtete Spektrum  $-90^\circ$ . Damit erfüllen diese Hydrophone die Erwartung an das Ersatzschaltbild in diesem Frequenzbereich, also an eine reine Kapazität.

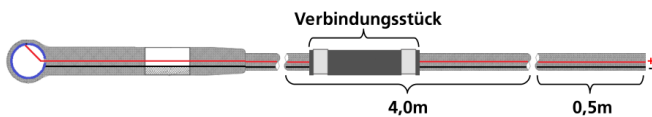
Die Impedanzbeträge aller defekten Modelle flachten zu den tiefen Frequenzen hin ab und liefen auf ohmsche Impedanzwerte zu. Zwar war der Betrag je Hydrophon verschieden groß, jedoch war der qualitative Verlauf bei allen derselbe. Auch in der Phase ließ sich ein ähnliches Verhalten beobachten: alle defekten Modelle drehten zu den tiefen Frequenzen von etwa  $-90^\circ$  in Richtung  $0^\circ$ .

Des Weiteren lag bei allen defekten Hydrophonen eine Gleichspannung am elektrischen Ausgang zwischen 14,5 mV (Defekt #3) und 170 mV (Defekt #1) an. Zum Zeitpunkt der Messung war keines der Hydrophone akustisch oder mechanisch belastet. Die Gleichspannungswerte wurden mit einem Multimeter der Firma UNI-T, Modell UT61B, gemessen.

## Impedanzanalyse eines Kabeldefekts

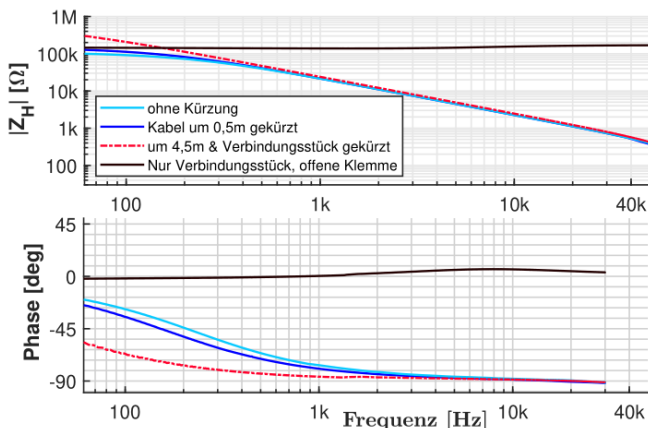
Die Kabel der in dieser Arbeit analysierten Hydrophone wurden mit Verbindungsstücken versehen, um die Längen individuell für die Langzeitmessungen in Wasser anzupassen. Hierfür wurde das vom Hersteller gelieferte Kabel abgetrennt und mit einem neuen Kabel verlötet. Um die Lötstelle wurde eine Vergussmuffe gestülpt und mit selbsthärtender Vergussmasse befüllt.

Um den Ursprung der Defekte aus Abbildung 5 weiter zu analysieren, wird das Kabel des Hydrophons „Defekt #3“ schrittweise zunächst um 0,5 m und dann erneut um 4,0 m inklusive Verbindungsstück gekürzt (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Kabelkürzung des Hydrophons „Defekt #3“ zur Lokalisation des Defekts (Abbildung abgewandelt nach [4])

Nach jeder Kürzung erfolgte eine Impedanzmessung des Hydrophons mit der entwickelten Messapparatur (Abbildung 7, blaue und rote Kurven). Darüber hinaus wurde das Verbindungsstück von Kabelanteilen befreit und mit offenen Klemmen auf seine elektrische Impedanz vermessen (schwarze Kurven).



**Abbildung 7:** Impedanzen des Hydrophons „Defekt #3“ vor und nach schrittweiser Entfernung von Kabelstücken (vgl. Abbildung 6). Die Impedanz der abgetrennten Verbindungsmuffe wurde mit offenen Kabelenden gemessen.

Anhand des Impedanzbetrages ließ sich eine Zunahme des defektinduzierten, ohmschen Widerstandswertes mit Abnahme der Kabellänge beobachten. Während die Impedanz bei 60 Hz im Ursprungszustand noch etwa 100 k $\Omega$  betrug, war sie nach 4,5 m Kabelkürzung und Entfernung des Verbindungsstücks auf etwa 300 k $\Omega$  gestiegen. Die Phase tendierte mit kürzerem Kabel zu einer Abnahme der Phase zu -90° in den tiefen Frequenzen. Sie betrug im Ursprungszustand bei 60 Hz etwa -25° nach 4,5 m Kabelkürzung und Entfernung des Verbindungsstücks etwa -58°.

Besonders auffällig war der ohmsche Widerstandswert des Verbindungsstücks von etwa 150 k $\Omega$ . Dieser Widerstand wurde ursprünglich aufgrund der offenen Kabelenden als bedeutend größer (bis nicht messbar) erwartet. Des Weiteren lag an den Kabelenden des Verbindungsstücks eine Gleichspannung von 10,5 mV an.

Die Kombination von ohmschem Widerstand und Gleichspannung legt die Vermutung nahe, dass sich im Verbindungsstück durch eingetretenes Salzwasser eine galvanische Zelle an den Lötstellen gebildet haben könnte. Eine derartige Zelle besteht aus zwei verschiedenartigen Metallen (hier Lötzinn und Kabelkupfer), die einerseits elektrisch kurzgeschlossen und andererseits eine Verbindung über ein Elektrolyt (Salzwasser) verbunden sind.

## Zusammenfassung

Es wurde erfolgreich eine Messapparatur samt Software entwickelt, mit der die komplexwertige elektrische Eingangsimpedanz von Hydrophonen im Bereich von 60 Hz bis 150 kHz gemessen werden kann.

Mithilfe der Apparatur wurden Hydrophone mit eingeschränktem Schallempfängerhalten auf ihre elektrische Eingangsimpedanz geprüft. Alle derartigen Hydrophone wiesen eine qualitativ einheitliche Abweichung zum idealen elektroakustischen Ersatzschaltbild unterhalb von 10 kHz auf. Diese Abweichung ist auf einen defektinduzierten ohmschen Widerstand im Kabel zurückzuführen, dessen Einfluss durch eine Kabelkürzung zwar verringert, aber nicht komplett entfernt werden konnte.

Da alle defekten Hydrophone darüber hinaus auch eine Gleichspannung am Ausgang aufwiesen, wird eine galvanische Zelle mit ohmschem Innenwiderstand im Kabel vermutet. Sie könnte sich durch Eintreten von Salzwasser gebildet haben.

## Literatur

- [1] C.R. Bowen, M. Lopez-Prieto, S. Mahon and F. Lowrie. „Impedance Spectroscopy of Piezoelectric Actuators“. In: *Scripta Materialia - SCRIPTA MATER* 42 (März 2000), S. 813–818
- [2] Demi Ai, Hui Luo und Hongping Zhu. „Diagnosis and validation of damaged piezoelectric sensor in electro-mechanical impedance technique“. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 28.7 (2017), S. 837–850
- [3] Antonin Novak, Pierrick Lotton und Laurent Simon. „Synchronized Swept-Sine: Theory, Application, and Implementation“. In: *J. Audio Eng. Soc* 63.10 (2015), S. 786–798
- [4] Teledyne Reson: *Hydrophone TC4033 Robust Spherical Reference Hydrophone - Outline Dimensions*. Leaflet, 2016. letzterZugriff: 06.01.2019. URL: <http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/TC4033%20%20product%20leaflet.pdf>