

# Hydrophone und ihre Kalibrierung für die Messung von Ultraschall

Christian Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: [ultrasonics@ptb.de](mailto:ultrasonics@ptb.de)

## 1. Einleitung

Ultraschall wird in sehr vielen Bereichen in Medizin, Technik und Alltag eingesetzt. Am meisten bekannt natürlich durch die millionenfache Anwendung zur medizinischen Diagnose in allen Fachrichtungen haben aber auch Ultraschallmethoden wie Reinigen, Sonochemie oder Werkstoffinspektion eine weite Verbreitung gefunden. Eine quantitative Analyse des Schallfeldes ist in allen Bereichen ein wesentlicher Schlüssel zur Beurteilung der Prozesse. Während bei medizinischen Anwendungen Fragen der Patienten- und Diagnosesicherheit oder der Abbildungsqualität im Vordergrund stehen spielen bei technischen Anwendungen vor allem Prozessbeschreibung und -optimierung eine wesentliche Rolle. Hydrophone und ihre Kalibrierung nehmen eine zentrale Stellung bei der Durchführung räumlich auflösender Messungen ein, die einen wesentlichen Bestandteil einer Schallfeldcharakterisierung ausmachen.

## 2. Arten gebräuchlicher Hydrophone

In der heutigen Messpraxis werden vor allem piezoelektrische aber auch optische Hydrophone verwendet. Wegen ihrer unkomplizierten Handhabung und dem einfachen Funktionsprinzip haben sich im Routinebetrieb vor allem piezoelektrische Hydrophone durchgesetzt. Als empfindliches Element werden Folien aus PVDF oder Piezokeramiken verwendet. Ist die PVDF-Folie über einen Ring gespannt und mit Elektroden bedampft, spricht man von einem Membranhydrophon, das eine hohe Bandbreite bei geringer Rückwirkung auf das Schallfeld hat. Membranhydrophone werden vor allem als Normalhydrophone eingesetzt. Nadelhydrophone besitzen einen kompakten Körper, auf dessen Ende ein kleines piezo-elektrisches Element aufgesetzt ist. Sie sind viel robuster und deshalb einfacher zu handhaben, stören aber das Schallfeld stärker. Wasserschallhydrophone haben größere piezo-elektrische Röhren oder Kugeln als empfindliche Elemente und liefern ein hohes Signal-Rauschverhältnis bei Frequenzen zwischen 1 kHz und 1 MHz. Unterschieden werden die Hydrophone aber vor allem auch nach dem einsetzbaren Frequenzbereich und dem stark frequenzabhängigen Übertragungsfaktor.

Obwohl die überwiegende Zahl der Hydrophone auf piezoelektrischer Basis arbeitet, werden auch optische Hydrophone im Routinebetrieb eingesetzt [1, 2]. Sie verfügen vor allem über eine extrem hohe Bandbreite und eine sehr hohe räumliche Auflösung.

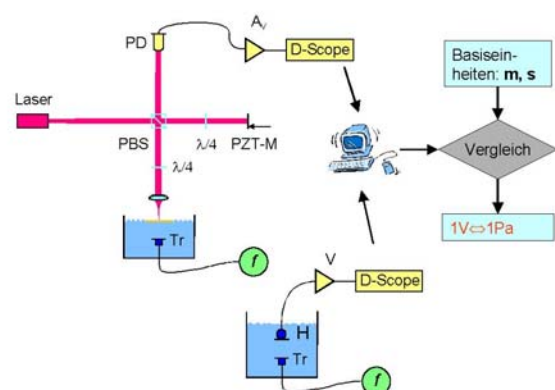
## 3. Kalibrierung von Hydrophonen

### 3.1 Primärkalibrierung von Hydrophonen

Bei der sorgsamsten Untersuchung der Übertragungseigenschaften von Hydrophonen stellt sich heraus, dass deutliche Schwankungen zwischen einzelnen Exemplaren ein und

desselben Typs bestehen. Verantwortlich hierfür sind Schwankungen der Materialeigenschaften, insbesondere der piezo-elektrischen Materialien und Herstellungstoleranzen, da viele Hydrophone von Hand gefertigt werden. Außerdem führen Alterungserscheinungen vor allem von Klebverbindungen zu Langzeitveränderungen. Deshalb ist eine Kalibrierung eines Hydrophones zwingend notwendig, die in sinnvollen Abständen wiederholt werden muss.

Eine primäre Kalibrieranordnung für Hydrophone muss einen Anschluss der Einheit 1 Pa Schallwechseldruck an das SI-System herstellen. An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, die nach dem Einheitengesetz für die Darstellung der physikalischen Einheiten zuständig ist, wird dieser Zusammenhang mit Hilfe eines Interferometers hergestellt [3]. Da ein Interferometer eine Auslenkung bestimmt, bezieht es sich auf die Grundeinheit 1 m. Da gleichzeitig die Ultraschallfrequenz gemessen und verarbeitet wird, ist auch der Bezug zur Sekunde vorhanden. Abbildung 1 zeigt den Aufbau des PTB-Interferometers. Ein Wandler beschallt eine auf der Wasseroberfläche eines gefüllten Tanks montierte dünne Folie (Dicke  $2\ \mu\text{m}$ ), die zur Erhöhung des optischen Reflexionsfaktors mit Aluminium beschichtet ist. Diese Folie folgt der Auslenkung des Schallfeldes, die von einem Michelsoninterferometer gemessen wird. Dabei stellt ein Regelkreis am Spiegel die Quadraturposition immer wieder ein. Das Messsignal wird in einem Computer gespeichert und bearbeitet, da insbesondere Korrekturen für die räumliche Mittlung des Schallfeldes, akustische Vielfachreflexionen in der Folie und die Übertragungsfunktion der Photodiode berechnet werden müssen.



**Abbildung 1:** Aufbau primäre Hydrophonkalibrierung: Tr: Wandler, H: Hydrophon, PBS: Polarisierender Strahlteiler, PD: Photodiode, V: Verstärker, PZT-M: Regelungsspiegel,  $\lambda/4$ : Polarisationsplatte.

Nach der interferometrischen Messung wird der optische Aufbau entfernt, Wasser aufgefüllt und die Messung unter vollkommen gleichen Bedingungen mit einem Hydrophon wiederholt. Nach Korrektur der elektrischen Last, die durch

den Verstärker erzeugt wird, erhält man durch Vergleich den Übertragungsfaktor des Hydrophons in V/Pa. Dieses Verfahren wird in der PTB im Frequenzbereich von 200 kHz bis ca. 75 MHz angewandt. Die Messunsicherheiten betragen - je nach Frequenz und Hydrophon - zwischen 7% und 15%.

### 3.2 Sekundärkalibrierung

Das interferometrische Verfahren ist zwar in einem sehr breiten Frequenzbereich einsetzbar dabei aber so aufwändig, dass Kalibrierungen für externe Kunden nicht wirtschaftlich durchgeführt werden können. Deshalb wird die Weitergabe der Einheit 1 Pa nur mit Hilfe von Substitutionsverfahren realisiert. Dabei wird ein zu testendes Hydrophon mit einem zuvor am Interferometer primär kalibrierten Normalhydrophon verglichen. Hierbei ist die Einhaltung von Freifeldbedingungen Grundvoraussetzung und es stehen im Moment an der PTB zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung.

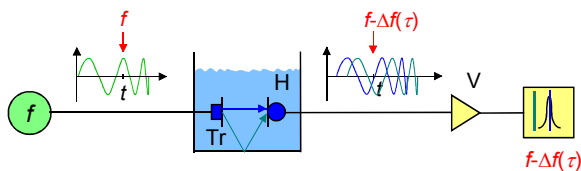


Abbildung 2: Funktionsprinzip der Time-delay Spectrometry (TDS), die Farben markieren die unterschiedlichen Signale und Signalwege.

Beim Time-delay Spectrometry-Verfahren (TDS) wird ein Wandler mit einem kontinuierlichen Signal mit steigender oder fallender Frequenz („chirp“) angeregt. Da der Schall zwischen Wandler und Hydrophon eine bestimmte Laufzeit benötigt, ist die instantane Frequenz des momentan gesendeten Signals etwas unterschiedlich vom zeitgleich empfangenen Schallfeld. Die Frequenzdifferenz ist vom Laufweg abhängig und wird zur Selektion des direkten Schalls genutzt. Hierbei kann inkohärent und kohärent (Einbeziehung der Phaseninformation) gemessen werden (Abbildung 2).

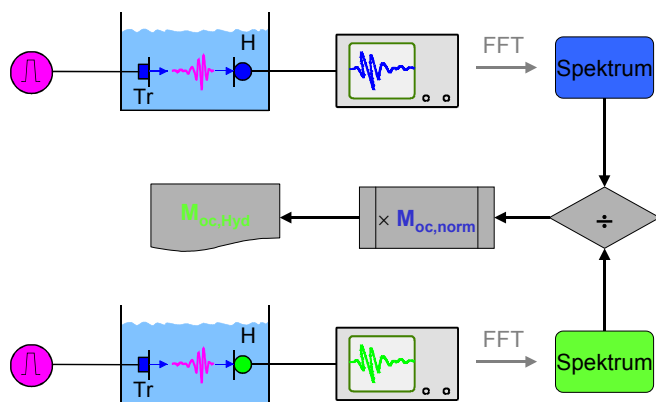


Abbildung 3: Funktionsprinzip der Impulskalibrierung, blaue Farbe markiert das Referenzhydrophon, grün das neu zu kalibrierende.

Das Impulsverfahren [2] nutzt zur Vermeidung von Störungen kurze Impulse, die im Zeitbereich von später eintreffenden Reflexionen leicht zu unterscheiden sind. Da ein kurzer Impuls ein breites Frequenzspektrum aufweist, können die dort vorhandenen Frequenzkomponenten zur gleichzeitigen Messung der gesamten Übertragungsfunktion verwendet werden. Dazu werden beide gemessenen Zeitsignale in den Frequenzbereich transformiert und dort verglichen (Abbildung 3).

## 4. Anwendung von Hydrophonen

Mit Hilfe der kalibrierten Hydrophone können Messungen in Schallfeldern durchgeführt werden [4]. Dabei wird in den meisten Fällen der zeitliche Verlauf der Signalspannung (proportional zum Schallwechseldruck) aufgezeichnet, aber auch die direkte Messung der Signalspannungsleistung als Maß für die Intensität kann vorgenommen werden. Aus diesen Rohdaten lassen sich viele Parameter gewinnen, die für eine Schallfeldcharakterisierung benötigt werden. Positiver und negativer Spitzendruck sowie die Druckamplitude (rms-Wert) ergeben sich direkt aus den Schalldruckwerten. Abgeleitete Größen wie die Arbeitsfrequenz, der Bündeldurchmesser, die Nahfeldlänge, die zeitlich gemittelte Intensität oder die Wiederholfrequenz werden mit Hilfe von festgelegten Prozeduren ermittelt.

Die internationalen Normen, die solche Parameter und deren Ermittlungsvorschriften für Messungen an medizinischen Geräten festlegen, befinden sich gerade in einer intensiven Überarbeitung. Dabei sollen die bisherigen Standards IEC 60866, IEC 61101, IEC 61102 + Amendment 1, IEC 62092 and IEC 61220 in einer Norm IEC 62127 mit drei Teilen zusammengefasst werden. In Teil 1 sollen dabei alle grundlegenden Abläufe der Messverfahren mit Hydrophonen beschrieben und festgelegt werden. Teil 2 beschäftigt sich mit den verschiedenen Kalibrierverfahren und Teil 3 legt grundsätzliche Anforderungen an die Eigenschaften von Hydrophonen fest. Für die einzelnen Ultraschallgerätearten, wie z. B. Diagnosegeräte oder Lithotriptoren selbst werden jedoch weiterhin spezielle Normen zuständig sein, die spezifische Messmethoden genauer beschreiben. Damit wird ein umfassendes Regelwerk geschaffen, das die Basis für Messungen an medizinischen Geräten bildet.

## Literatur

- [1] A. J. Coleman, E. Draguioi, R. Tiptaf, N. Shotri, J. A. Sounders, *Ultras. Med. & Biol.* **24** (1998), 143-151.
- [2] V. Wilkens, C. Koch, *J. Acoust. Soc. Am* **115** (2004), 2892-2903.
- [3] Ch. Koch, W. Molkenstruck, *IEEE Trans. UFFC*, **46** (1999), 1303-1314.
- [4] G. R. Harris, 1999 IEEE Ultrasonics Symposium, 1341-1352.