

# CHARAKTERISIERUNG VERSCHIEDENER HYDROPHONE UNTER STOSSWELLENBEDINGUNGEN IN WASSER

J. Staudenraus, M. Köhler, W. Eisenmenger

1. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

## 1. Einführung

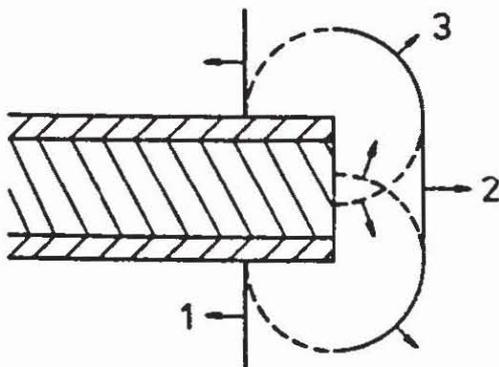
Die in die Stoßwellenmeßtechnik eingeführten PVDF-Sonden- /1/, Nadel- /1/ und Membranhydrophone /2/ zeigen, ebenso wie das faseroptische /3/ und das elektrostatische Sondenhydrophon /4/, im Druckbereich 0-600 bar ein weitgehend lineares Verhalten. Über deren Sprungantwortfunktion jedoch ist ebenso wie über die Hydrophoneigenschaften bei den für Freifeldfokussierungsexperimente /5/ typischen Unterdrücken von -100 bar bisher nur wenig bekannt.

## 2. Theorie: Sprungantwort

Zunächst sei im gesamten Druckbereich lineares Verhalten vorausgesetzt. Für Impulsschallanwendungen günstig ist die Darstellung der Hydrophonempfindlichkeit im Zeitbereich als Sprungantwort  $m(t)$ . Faltung von Deltaimpulsantwort  $\dot{m}(t)$  und akustischer Impulsform  $p(t)$  liefert das Hydrophonsignal.

Die Abweichung der Sprungantwort eines Sonden- bzw. Nadelhydrophons von der idealen Rechteckstufe ist im wesentlichen durch die vom Hydrophon ausgehenden sekundären Schallfelder bestimmt. Das gestörte Schallfeld (Bild 1) setzt sich zusammen aus der einfallenden, der schallhart reflektierten und der am Hydrophonrand gebeugten Welle. Im Fall eines Drucksprunges beträgt der für das SONDENSIGNAL maßgebliche Schalldruck aufgrund schallharter Reflexion zunächst das Doppelte der einfallenden Welle. Sobald jedoch die phaseninvertierte Beugungswelle das aktive Element vollständig erfaßt hat, geht der resultierende Druck auf den der einfallenden Welle zurück.

Die experimentelle Aufzeichnung der Hydrophonsprungantwort (bei gleichzeitiger Absoluteichung durch Messung rein elektrischer Größen) erfolgt mit Hilfe des Einschwingvorganges einer genügend dicken piezoelektrischen Platte /6/, wobei ein Rechteckwellenzug der Amplitude 0.5 bar in Wasser abgestrahlt wird.



**Bild 1:** Störung eines ebenen Drucksprunges durch das zylindrische Ende eines Sondenhydrophons: Aufspaltung in einfallende (1), schallhart reflektierte (2) und gebeugte Welle (3).

— Kompression, - - - Expansion

### 3. Piezoelektrische Sonden- bzw. Nadelhydrophone

Für Nadelhydrophone mit halbkugelförmiger Spitze ( $\varnothing$  1 mm,  $\varnothing$  aktive Zone 0.5 mm /1/) klingt die durch schallharte Reflexion verursachte Signalüberhöhung der Rechteckimpulsantwort innerhalb 500 ns ab (Bild 2a). Im Brennpunkt eines elektromagnetischen Kalottenstrahlers ( $R=200$  mm,  $\varnothing$  110 mm) /5/ mit Hilfe des Nadelhydrophons aufgezeichnete Stoßwellensignale zeigt Bild 3a,b. Betrachtet man zunächst die Überdruckphase und setzt diese in Beziehung zur Rechteckimpulsantwort so wird deutlich, daß zur Ermittlung der tatsächlichen Stoßwellenform und Amplitude eine Entfaltung des Signals erforderlich ist.

Das Unterdruckverhalten des Hydrophons zeigt eine starke Abhängigkeit von der Vorbehandlung. Die Signalform Bild 3a entstand ohne vorhergehende Reinigung, nachdem das Hydrophon zuvor einige Wochen unbenutzt der Raumluft ausgesetzt war. Auch nach etwa 50 Stoßwellenimpulsen war sie nahezu unverändert. Das etwa 1 Stunde später aufgezeichnete Signal (Bild 3b) des nun Extran- gereinigten und in einen Gelatinezylinder eingegossenen Hydrophons besitzt weit höhere Unterdruckanteile. Ähnlich hohe Unterdruckanteile lassen sich bei sorgfältig gereinigtem Hydrophon im Wasserbad mit Netzmittelzusatz nachweisen.

Als entscheidender Parameter scheint demzufolge die Benetzung bzw. die Kavitationsschwelle an der Hydrophonoberfläche in die Signalform einzugehen: Bei hohen Unterdrücken wird die Impulsform mangels ausreichender Adhäsion nur unvollständig auf das Hydrophon übertragen. Die Hydrophonoberfläche selbst wirkt als akustische Diode, deren "Sperrdruck" durch die Kavitationsschwelle an der Grenzfläche gegeben ist.

### 4. Membranhydrophone

Das für Stoßwellenmessungen eingesetzte modifizierte Membranhydrophon besteht aus zwei Kunststoffringen mit einer dazwischen geklebten, akustisch annähernd transparenten 24  $\mu\text{m}$  PVDF-Folie. Die piezoelektrisch aktivierte Zone ist durch die Gestalt der aufgedampften Goldelektroden auf eine Kreisfläche mit Durchmesser 0.8 mm begrenzt. Durch jeweils außen auf die Ringe geklebte Kunststofffolien (25  $\mu\text{m}$ ) entstehen zwei getrennte Kammern, die mit entgastem, destilliertem Wasser gefüllt sind. Hierdurch wird zum einen Ladungsabfluß über die Leitfähigkeit des umgebenden Wasserbades vermieden, zum andern wird gleichzeitig die Kavitationsschwelle im Hydrophoninnern erhöht.

Die Rechteckimpulsantwort des Hydrophons (Bild 2b) entspricht annähernd dem abgestrahlten Rechteckwellenzug mit einer Anstiegszeit von 50 ns. Das Stoßwellensignal (Bild 3c,d) und die akustische Impulsform stimmen somit zumindest während der Überdruckphase weitgehend überein. Bei höherer Zeitauflösung (Bild 4a) folgt auf die Stoßfront eine stark gedämpfte Oszillation, deren Ursache

akustische Vielfachreflexionen innerhalb der 24  $\mu\text{m}$  PVDF-Folie sind. Diese Störung der Sprungantwort klingt jedoch innerhalb so kurzer Zeit ab, daß die Stoßfrontamplitude aus der im übrigen weitgehend unverzerrt wiedergegebenen Überdruckphase extrapoliert werden kann.

Die im Unterdruckverhalten beobachtete hohe statistische Streuung wird, wie im Fall der Nadelhydrophone, auf unvollständige Unterdruckübertragung durch Kavitation an der PVDF-Folienoberfläche zurückgeführt.

#### 5. Elektrostatisches Sondenhydrophon

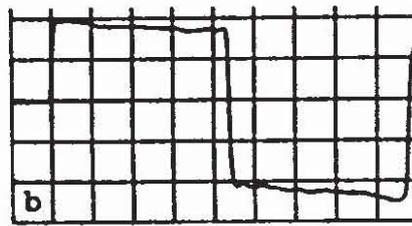
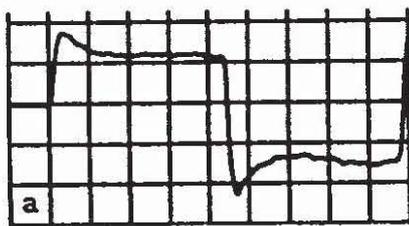
Eine direkte Messung der Schnelle gelingt für Druck- und Stoßwellenimpulse hoher Amplitude durch Abtastung einer die Schallwelle reflektierenden Wasseroberfläche mit Hilfe einer elektrostatischen Sonde /5/. Auch hier ist die sich an der als Detektor benutzten Wasseroberfläche einstellende Teilchenschnelle von der Schnelle im freien Feld verschieden. Im Grenzfall einer senkrecht einfallenden ebenen Welle bleibt ein zeitunabhängiger, durch schallweiche Reflexion bedingter Faktor 2 bestehen. Messungen in der Fokuszone fokussierter Stoßwellen sind wegen der dort nahezu ebenen Stoßfront somit ohne nachfolgende Entzerrung möglich. Beginnend bei Drucken ab etwa 200 bar führt jedoch die bei Druckumkehr unter der Wasseroberfläche auftretende Kavitation zu starken Signalverzerrungen /5/.

#### 6. Faseroptisches Sondenhydrophon

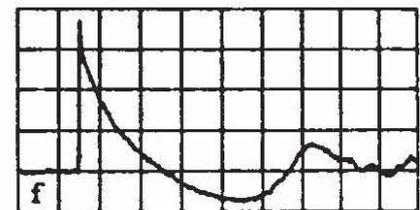
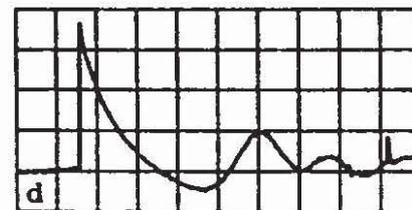
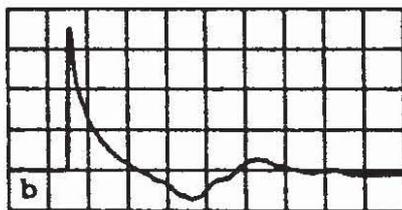
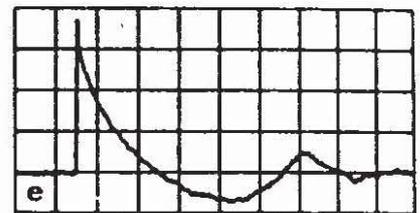
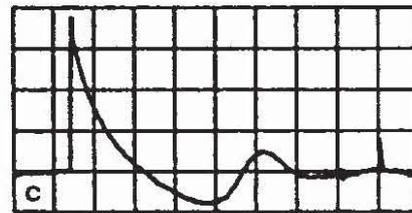
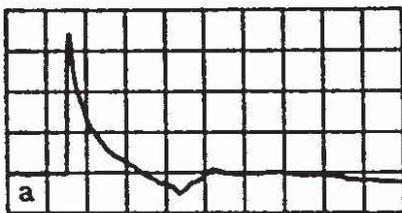
Als Drucksonde wird eine Glasfaser in das akustische Wellenfeld eingeführt und die durch zeitliche Druckänderung hervorgerufene zeitliche Variation der Lichtreflexion als Hydrophonsignal verwendet. Im gut reproduzierbaren Stoßwellensignal des optischen Sondenhydrophons (Bild 3e+f) kann Kavitation auf oder in nächster Nähe der Faserstirnfläche, aufgrund des wesentlich höheren Reflexionskoeffizienten gegen Wasserdampf, ausgeschlossen werden. Im Unterschied zu den anderen Hydrophonen ist somit hier von einer vollständigen Unterdruckübertragung auszugehen. Im übrigen stimmen die Stoßwellensignale des optischen Sondenhydrophons und des Membranhydrophons solange überein, bis im Signal des letzteren kavitationsbedingt der Unterdruckanteil verschwindet.

Aus Empfindlichkeitsgründen ist eine Charakterisierung des optischen Sondenhydrophons mit Hilfe der Rechteckimpulsantwort bei den niedrigen Drücken der piezoelektrischen Platte noch nicht möglich. Dem Faserdurchmesser von 140  $\mu\text{m}$  entsprechend tritt jedoch bei höherer Zeitauflösung des Stoßwellensignals Bild 3e die aufgrund schallharter Reflexion an der Faserstirnfläche erwartete Empfindlichkeitsüberhöhung als 80 ns breite "Nase" (Bild 4b) in Erscheinung. Deren geringe Breite im Vergleich zur gesamten Signalbreite erlaubt, wie im Fall

des Membranhydrophonsignals, eine Extrapolation der Stoßfrontamplitude aus der für  $t > 80$  ns nahezu unverzerrt wiedergegebenen Impulsform.

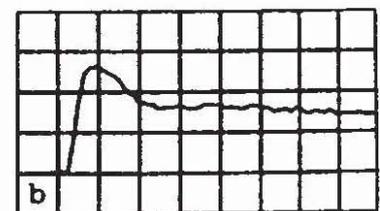
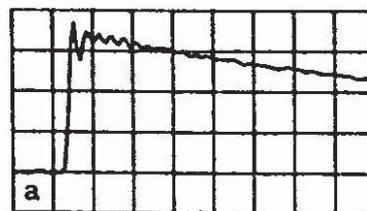


**Bild 2:** Rechteckimpulsantwort (a) Nadel-, (b) Membranhydrophon  
0.5  $\mu\text{s}/\text{Skt.}$ , 0.3 bar/Skt.



**Bild 3:** Nacheinander im Fokus eines elektromagnetischen Kalottenstrahlers aufgezeichnete Stoßwellensignale; 2  $\mu\text{s}/\text{Skt.}$ , 95 bar/Skt.  $\pm 10\%$ . Signalform des (a) nicht vorbehandelten, (b) Extran- gereinigten, gelatineüberzogenen Nadelhydrophons, (c)+(d) Membranhydrophons, (e)+(f) optischen Sondenhydrophons.

**Bild 4:** Stoßfrontsignale des (a) Membranhydrophons, bandbreitenbegrenzt durch die Folienlaufzeit (PVDF, 24  $\mu\text{m}$ ); 50 ns/Skt., 95 bar/Skt..



(b) des faseroptischen Sondenhydrophons, Verstärkerbandbreite 20 MHz; 50 ns/Skt., 165 bar/Skt.

## 7. Schrifttum:

- /1/ Müller, M., Dissertation, RWTH Aachen (1987)
- /2/ Coleman, A.J., Saunders, J.E., *Ultrasound Med. Biol.* 15, 213 (1989)
- /3/ Staudenraus, J., Eisenmenger, W., *Fortschritte der Akustik-DAGA'88*, 467
- /4/ Lawrenz, W. et al., *Fortschritte der Akustik-DAGA'88*, 463
- /5/ Staudenraus, J., Eisenmenger, W., *Fortschritte der Akustik-DAGA'91*
- /6/ Eisenmenger, W., *Acustica* 12, 165 (1962)