

ELEKTROSTATISCHES SONDENHYDROPHON MIT EINFACHER ABSOLUTEICHTUNG

W. Lawrenz, J. Staudenraus, W. Eisenmenger

1. Physikalisches Institut der Universität Stuttgart

Absolutmessungen der Schnelle oder des Druckes in Flüssigkeitsschallfeldern, wie sie z.B. bei Stoßwellen auftreten, verlangen akustische Sonden großer Bandbreite, hoher Lebensdauer bei Stoßdrücken bis in den 1 kbar Bereich, akustische Rückwirkungsfreiheit, d.h. flachen Frequenzgang, und sichere Eichbarkeit durch einfache Primärmaßstäbe. Diese Forderungen können mit Hilfe einer elektrostatischen Sonde zur Messung der Schnelle an einer die Schallwelle reflektierenden Flüssigkeitsoberfläche erfüllt werden. Die elektrostatische Sonde ist hierbei eine Alternative zur interferometrischen Bestimmung /1/ der Auslenkung der Flüssigkeitsoberfläche bei der Ultraschallreflexion.

Meßanordnung und Eichprinzip

Eine vom Generator kommende Druckwelle (vergl. Abb. 1) wird an der durch eine einseitig Al-bedampfte, 7 μm dicke Hostaphanfolie bedeckten Wasseroberfläche reflektiert. Diese Folie ist als Gegenelektrode über einen geerdeten Abschirmbecher gespannt. Als Sonde dient ein Cu-Blechstück von 3 mm Durchmesser am unteren Ende eines Kunststoffrohrs (Trinkhalm), das an einem dynamischen Lautsprecher-

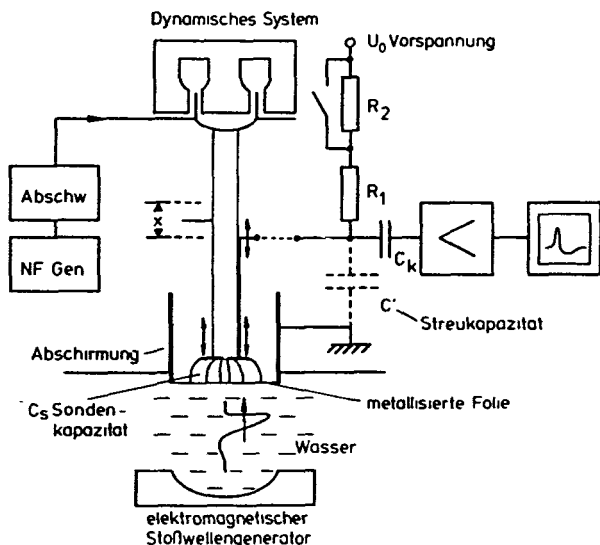


Abb. 1: Meßprinzip des eichbaren elektrostatischen Hydrophons

system befestigt ist. Der Sondenabstand zur Folie wird mit einer Mikrometerschraube eingestellt. Die Sonde ist über einen dünnen Kupferdraht von $70 \mu\text{m}$ \varnothing (Herabsetzung der Streukapazität) mit einem Verstärker geringer Eingangskapazität (ca 1 pF , hochohmiger Eingangswiderstand ca. $1 \text{ G}\Omega$) und einer Bandbreite von 5 MHz verbunden. Über die Vorwiderstände $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$ liegt die Sondenvorspannung U_0 von 45 Volt an Sonde und Koppelkondensator C_k . Bei den Messungen des Schnellesignals wird allein der Vorwiderstand R_1 mit einer Sondenzeitkonstante $R_1 \cdot (C_s + C') = 10^{-7} \text{ s}$ und einer geschätzten maximalen Gesamtkapazität von 10 pF ($C_s = \text{Sondenkapazität}$; $C' = \text{Streukapazität}$) benutzt. Die obere Grenzfrequenz für Schnellmessungen entspricht dem Kehrwert der Sondenzeitkonstante.

Zur Eichung wird der Widerstand R_2 von $10 \text{ M}\Omega$ zugeschaltet. Hierdurch steigt die Schnellempfindlichkeit um den Faktor 1000 bei gleichzeitiger Erhöhung der Sondenzeitkonstante auf 10^{-4} s . Die Sonde wird nun bei unverändertem mittleren Sondenabstand mit Hilfe des dynamischen Lautsprechersystems zu Sinusschwingungen (140 Hz) mit innerhalb des Meßbereichs freier Amplitude angeregt und das entsprechende Sonden-signal bestimmt. Im linearen Bereich des Sonden-signals ist die Lautsprecheramplitude hierbei noch so klein (starke Abschwächung des NF-Generatorsignals), daß eine mikroskopische Bestimmung der Sondenamplitude ausscheidet. Anschließend kann jedoch der mittlere Sondenabstand vergrößert und die Lautsprecheramplitude so weit gesteigert werden, daß eine direkte mikroskopische Amplitudenbestimmung (Schattenbreite "X", vergl. Abb. 1, im Okularmikrometer) möglich ist. Aus der Änderung der Abschwächereinstellung ergibt sich hiernach die Sondenamplitude bei der Eichung, und unter Berücksichtigung der Frequenz die entsprechende "Eichschnelle".

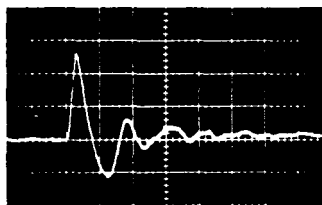
Bei den verschiedenen Schritten erfolgte jeweils eine Linearitätskontrolle. Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit wird der Eichvorgang in umgekehrter Reihenfolge auch vor der Messung durchgeführt.

Sondenempfindlichkeit und Linearität können durch Veränderung des mittleren Sondenabstands (Mikrometerschraube) eingestellt werden.

Wegen des starken Einflusses von Gebäudeschwingungen auf die Empfindlichkeit wurde eine einfache Erschütterungsisolierung der Gesamtanordnung durch Lagerung auf einem luftgefüllten Zweiradschlauch gewählt.

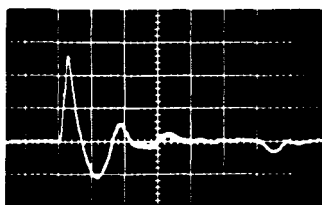
Meßbeispiele:

Abb. 2a zeigt als Meßbeispiel zwei Vergleichssignale zwischen elektrostatischer Sonde und einem selbstgefertigten Nadelhydrophon nach Platte /2/ im Fokus eines selbstfokussierenden elektromagnetischen Stoßwellengenerators /3/ (Entladespan-



← 5 μ s

Elektrostatisches Sondenhydrofon



← 5 μ s

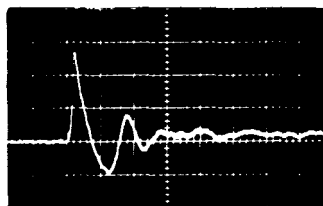
PVDF Nadelhydrofon

$$P_{\max} = 75 \text{ bar} \pm 15 \%$$

Abb. 2a: Stoßwellensignal im Fokus bei 10 kV Entladespannung, $C = 1 \mu\text{F}$

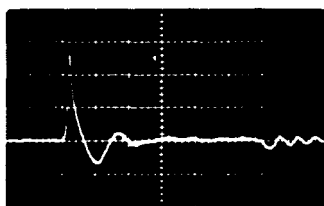
nung 10 kV, Kapazität $1 \mu\text{F}$). Zur Messung mit dem Nadelhydrophon wurde das Meßgefäß mit Wasser aufgefüllt. Die Signalformen stimmen sowohl hinsichtlich der Anstiegszeit als auch hinsichtlich des weiteren Druckverlaufs recht gut überein. Der angegebene Druck entspricht einer Eichung des Nadelhydrophons mit Hilfe der akustischen Sprungantwort einer piezoelektrischen Platte /4/. Bei der Eichung der elektrostatischen Sonde wurden innerhalb von $\pm 20\%$ gleiche Druckwerte erhalten. Diese Schwankungen der Druckwerte beruhen auf tieffrequenten Abstandsänderungen zwischen Sonde und Folie verursacht durch restliche Gebäudeschwingungseinflüsse sowie durch Fehler bei der mikroskopischen Amplitudenablesung.

Abb. 2b zeigt unter sonst gleichen Bedingungen das elektrostatische Sondenignal und das Nadelhydrophonsignal bei der Entladespannung von 12 kV und entsprechend höherem Fokaldruck. Beide Signale geben die nun erhöhte Frontsteilheit (Ausbil-



← 5 μ s

Elektrostatisches Sondenhydrofon



← 5 μ s

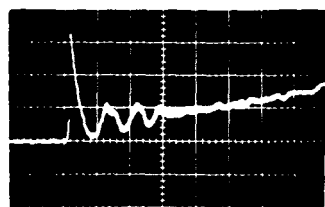
PVDF Nadelhydrofon

$$P_{\max} = 150 \text{ bar} \pm 15 \%$$

Abb. 2b: Stoßwellensignal im Fokus bei 12 kV Entladespannung, $C = 1 \mu\text{F}$

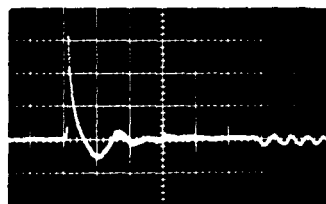
ung der Stoßwelle bei zunehmendem Druck) sowie die sonstige Signalform in guter Übereinstimmung wieder, wobei das Nadelhydrophon etwas schwächere Oszillationen zeigt.

Bei der Entladespannung von 14 kV gibt Abb. 2c für beide Hydrophone eine voll ausgebildete Stoßfront wieder. Das elektrostatische Sondenhydrophon zeigt jedoch nun ein nach Eintreffen der Stoßwelle linear ansteigendes Untergrundsignal, das vermutlich auf Kavitation unmittelbar unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche durch Druckumkehr nach der Reflexion zurückzuführen ist.



← 5 μ s

Elektrostatisches Sondenhydrofon



← 5 μ s

PVDF Nadelhydrofon

$P_{\max} = 270 \text{ bar} \pm 15 \%$

Abb. 2c: Stoßwellensignal im Fokus bei 14 kV Entladespannung, $C = 1 \mu\text{F}$

Schlußbemerkungen

Das elektrostatische Sondenhydrophon eignet sich zur Absolutmessung von breitbandigen Stoßwellensignalen in Flüssigkeiten im Druckbereich von 100 bar. Es kann verhältnismäßig einfach geeicht werden. Verbesserungen sind bei der Bestimmung der Sondenamplitude, z.B. durch Interferometrie möglich. Außerdem ist eine wirksame tieffrequente Erschütterungsisolierung erforderlich.

Literatur:

- /1/ Reibold, R., Fortschritte der Akustik, DAGA 87, DPG GmbH, pp. 79-92
- /2/ Platte, M., Acustica, Vol 54, 23 (1983)
- /3/ Staudenraus, J. et al., Fortschr.d.Akustik, DAGA 87, DPG GmbH, pp. 445
- /4/ Eisenmenger, W., Acustica, Vol 12 (1962), p. 165