

# Einsatz einer breitbandigen Piezodrucksonde auf PVDF-Basis zur Untersuchung konvergierender Stoßwellen in Wasser

von M. Müller

Stoßwellenlabor, Institut für Luft- und Raumfahrt  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

und M. Platte

Institut für Technische Akustik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

## Zusammenfassung

Zur quantitativen Untersuchung konvergierender Stoßwellen in Wasser wird eine Drucksonde auf der Basis von Polyvinylidenfluorid vorgestellt. Kleine Abmessungen der Empfangsfläche, geringe Anstiegszeiten und lineares Empfangsverhalten bei hoher Schalldruckamplitude ermöglichen Messungen bis in den Fokusbereich. Bei einem durch den Durchmesser der Sonde gegebenen Auflösungsvermögen unterhalb 500 µm wird im ebenen Wellenfeld eine innerhalb 3 dB konstante Empfindlichkeit bis 10 MHz gefunden. Linearität zwischen Druck und elektrischem Ausgangssignal der Sonde kann bis 30 MPa nachgewiesen werden. Die Einsatzmöglichkeiten werden in einem Fokussierungsexperiment verdeutlicht.

*The Use of a Broad-band Piezo-pressure Probe, based on PVDF,  
Research on Converging-Shock-Waves in Water*

## Summary

For quantitative research on converging shock waves in water a pressure probe was suggested which was based in polyvinylfluoride. With a small area of receiving surface, minimum rise-time and linear-reception at a higher wave amplitude, measurements are possible up to the focal "spot". Arising from the small probe diameter a resolution is found possible of less than 500 µm. In the plane wave-field, a constant sensitivity of 3 dB up to 10 MHz. Linearity between pressure and electrical output signal of the probe, up to 30 MPa can be verified. The possibilities were made evident in a focussing experiment.

*Mise en œuvre d'une sonde piézo-électrique à base de fluorure de polyvinylidène pour étudier  
les ondes de choc convergentes dans l'eau*

## Sommaire

On présente un capteur de pression à base de PVDF (fluorure de polyvinylidène) destiné à une étude quantitative des ondes de choc convergentes en milieu aqueux. La petitesse de la surface sensible, la brièveté du temps de montée et la linéarité des caractéristiques jusqu'à des valeurs très élevées de la pression acoustique assurent à ce capteur des possibilités exceptionnelles qui autorisent des mesures jusqu'à l'intérieur du domaine de focalisation. Le pouvoir de résolution, qui dépend du diamètre de la sonde, descend en dessous de 500 µm et l'on a observé une sensibilité constante à moins de 3 dB près jusqu'à 10 MHz vis-à-vis d'une onde plane. La linéarité entre pression acoustique et signal électrique de sortie a été vérifiée jusqu'à une pression de 30 MPa. Les possibilités de ce capteur ont été illustrées dans une expérience de focalisation.

## 1. Einleitung

In jüngster Zeit beobachtet man ein zunehmendes Interesse an der Konzentration mechanischer Energie durch Fokussierung von Stoßwellen in Wasser. Von Belang für die Nutzungsmöglichkeiten sind neben der Geometrie des Fokusbereichs vor allem die hohen Druckamplituden, die je nach Einfallswinkel bis weit in den Kilobarbereich hineinreichen können und z. B. in der medizinischen Technik zur Zerstörung von Nierensteinen ausreichen [1].

Eingehende Untersuchungen der zeit- und ortsabhängigen Schalldruckänderungen, aus deren

Kenntnis heraus z. B. bei auftretenden Nichtlinearitäten Rückschlüsse auf die ideale Reflektorform gewonnen werden können, erfordern Meßmethoden, mit denen quantitative Aussagen möglich sind.

Wie Eisenmenger [2] zeigte, besitzen Stoßwellen in Wasser je nach Entstehung und Lauflänge, Anstiegszeiten von nur wenigen Nanosekunden.

So ergibt sich für die quantitative Meßwertermittlung bei diesen Untersuchungen ein spezielles Anforderungsprofil:

- Abdeckung eines weiten Druckbereichs,
- Erfassung sehr schneller Schalldruckänderungen,
- hohes lokales Auflösungsvermögen.

Die in der Gasdynamik übliche Druckbestimmung über die Stoßwellengeschwindigkeit ist bei konvergierenden Wellen praktisch unmöglich, da sich die Geschwindigkeit und damit der Druck von Ort zu Ort ändern. Des weiteren ändert sich die Stoßwellengeschwindigkeit bei Wasserstoßwellen nur sehr langsam mit zunehmender Druckamplitude, so daß die aus der Messung resultierenden Ungenauigkeiten in der Größenordnung der Geschwindigkeitsänderung liegen.

Optische Meßmethoden zur Druckbestimmung, wie z. B. die Betrachtung von Interferenzstreifenverschiebungen können zwar im zweidimensionalen Wellenfeld zu akzeptablen Ergebnissen führen, versagen aber u. a. im dreidimensionalen Fall sowie hinsichtlich der Auswertung des Fokusbereichs.

Die Verwendung handelsüblicher Druckaufnehmer wird durch die relativ hohen Anstiegszeiten im Bereich von  $1 \mu\text{s}$  sowie die große Ausdehnung der Empfangsflächen eingeschränkt [3, 4]. Lediglich bestimmte piezoresistive Aufnehmer scheinen hinsichtlich der Grenzfrequenz die Anforderungen zu erfüllen [5].

Anfängliche Versuche, Stabdruksonden mit piezoelektrischen Keramiken unter Beachtung des spezifischen Anforderungsprofils aufzubauen, scheiterten an den stabilitätsbedingten Mindestabmessungen und den damit verbundenen zu großen Anstiegszeiten. Demgegenüber ist die Herstellung eines Aufnehmers auf der Basis des piezoelektrisch polarisierbaren Hochpolymers Polyvinylidenfluorid (PVDF) aufgrund der vielfältigeren Verarbeitbarkeit günstiger. Beispiele dazu findet man in den seit einigen Jahren bekannt gewordenen Hydrophonen der Ultraschalltechnik, die mit kleinsten Empfangsflächen und breitbandigem Übertragungsverhalten die Messung schneller zeitlicher Abläufe und örtlicher Strukturen ermöglichen [6–9].

Das erst kürzlich entwickelte PVDF-Nadelhydrophon [10, 11] besteht aus einer mit PVDF beschichteten Metalnadel, wobei nur ein kleiner Bereich an der Nadelspitze piezoelektrisch ist.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Verwendbarkeit dieses Hydrophons als Druckaufnehmer zur Untersuchung konvergierender Stoßfronten hoher Amplitude. Erste Meßergebnisse werden angegeben und mit denen herkömmlicher Druckaufnehmer aus piezokeramischen Materialien verglichen.

## 2. Verwendbarkeit von PVDF zur Herstellung breitbandiger Druckaufnehmer für Wasserschall

Wegen seiner niedrigen akustischen Impedanz  $Z = \rho c$  ( $\rho$  = Dichte,  $c$  = Schallgeschwindigkeit) von

$3,9 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  bietet PVDF unter den zur Zeit gebräuchlichen piezoelektrischen Wandlermaterialien die beste akustische Impedanzanpassung an flüssige Medien (Wasser:  $\rho_w c_w = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ). PVDF ist einerseits in Form flexibler piezoelektrischer Folien mit Dicken bis herab zu  $6 \mu\text{m}$  erhältlich. Andererseits lassen sich durch geeignete Thermoförmvorgänge mehrfach gekrümmte, freitragende Schalen oder Beschichtungen herstellen, die z. B. durch die Koronaentladungsmethode [10] piezoelektrisch aktiviert werden können.

Ultraschallwandler aus piezoelektrischen Materialien bestehen in der Regel aus einem mechanischen Trägermaterial, auf das ein zumeist scheibenförmiges piezoelektrisches Element mit beidseitiger elektrischer Kontaktierung aufgebracht ist. Die geringen Schichtdicken von PVDF ermöglichen gegenüber üblichen piezokeramischen Materialien die Herstellung von Wandlern mit sehr hoher Bandbreite, die allgemein bei piezoelektrischen Wandlern für Ultraschall dem Quotienten aus Schallgeschwindigkeit und Dicke proportional ist. Sie wird bei Wandlern aus piezokeramischen Materialien durch die geringste noch herstellbare Schichtdicke ( $\approx 50 \mu\text{m}$ ) und durch praktische Gesichtspunkte bezüglich der Verarbeitbarkeit der leicht zerbrechlichen Keramikscheiben begrenzt, deren Querabmessungen darüber hinaus wegen möglicher störender Radialschwingungen nicht zu klein sein dürfen. Gekrümmte piezoelektrische Oberflächen lassen sich außerdem bei Piezokeramiken nur in herstellungstechnisch aufwendiger Weise realisieren.

Aufgrund der guten Impedanzanpassung an Wasser können breitbandige Wandler aus PVDF für Wasserschallanwendungen in verschiedener Weise aufgebaut sein. Neben dem bei piezokeramischen Materialien üblichen Aufbau, bei dem das empfindliche Element auf ein dem Wandlermaterial akustisch angepaßtes und stark absorbierendes Trägermaterial aufgebracht ist, kann die PVDF-Folie sowohl beidseitig – wie z. B. in [6] – an das Übertragungsmedium Wasser angrenzen, als auch rückseitig auf ein schallhartes Trägermaterial aufgeklebt sein, das vorzugsweise ein Metall mit hoher elektrischer Leitfähigkeit ist. In den beiden ersten Fällen liegt das erste Minimum der hochohmig gemessenen Empfangsempfindlichkeit bei der Frequenz  $f_0 = c/d$  ( $\lambda/2$ -Resonanz), wenn  $d$  die Schichtdicke des piezoelektrischen Materials ist, im letzten Fall bei  $f_0 = c/2d$  ( $\lambda/4$ -Resonanz). Der schallharte Abschluß hat wegen des Wegfalls der zusätzlichen rückseitigen Elektrode, deren Funktion vom Trägermaterial selbst übernommen wird, und der mechanischen Robustheit des damit aufgebauten Wand-

lers Vorteile und wird auch im Fall des als Drucksonde verwendeten Nadelhydrophons benutzt.

### 3. Aufbau des Druckaufnehmers

Fig. 1a zeigt den prinzipiellen Aufbau, Fig. 1b die Gesamtansicht der Nadelsonde. In der Nähe der Nadelspitze ist die Schichtdicke am geringsten, während sie mit zunehmendem Abstand von der Nadelspitze rasch zunimmt. Piezoelektrisch ist nur ein kleiner Bereich der Beschichtung an der Nadelspitze. Die Nadel ist gleichzeitig reflektierender Abschluß und innere Elektrode des Aufnehmers. Die äußere Elektrode wird durch einen dünnen Überzug eines leitfähigen Lacks oder durch eine aufgedampfte Schicht aus Chrom, Nickel oder Silber gebildet. Die ganze Anordnung wird von einer Metallkanüle getragen, durch die gleichzeitig die elektrische Zuleitung zur Nadel geführt und die mechanische Stabilität des Gesamtaufbaus garantiert wird.

Eine ausführlichere Beschreibung der Herstellung und des Aufbaus befindet sich in [11, 12].

Bei der im folgenden verwendeten Nadelsonde beträgt der Krümmungsradius der Metallnadel im Bereich der Spitze etwa  $150\ \mu\text{m}$ , während der äußere Rand der Beschichtung einen mittleren Krümmungsradius von etwa  $250\ \mu\text{m}$  aufweist. Die minimale Beschichtungsdicke an der Nadelspitze beträgt

etwa  $20\ \mu\text{m}$ . Die Ausdehnung der piezoelektrisch aktiven Zone von der Nadelspitze aus in Richtung Aufnehmerhalterung, innerhalb der die Stärke der Piezoelektrizität der Beschichtung auf 25% des maximalen Wertes an der Spitze abgesunken ist, wird auf etwa  $300\ \mu\text{m}$  geschätzt. Der Durchmesser des stabilisierenden Metallröhrchens beträgt  $3\ \text{mm}$ ; die Gesamtlänge kann bis auf  $15\ \text{mm}$  reduziert werden [12].

### 4. Übertragungsverhalten

#### 4.1. Empfangsempfindlichkeit bei niedriger Schallintensität

Fig. 2a zeigt die im ebenen Schallfeld in Wasser bei maximal 1 bar Wechseldruck gemessene Empfangsempfindlichkeit einer Nadelsonde in dB bezüglich 1 V/bar. Die Empfangsempfindlichkeit ist dabei inklusive 40 cm Zuleitungskabel an einer Eingangsimpedanz des Meßverstärkers von  $1\ \text{M}\Omega/20\ \text{pF}$  zu verstehen. Die gemessenen Werte beschreiben einen anfangs schwach, oberhalb 10 MHz rasch abfallenden Verlauf, der als Geometrieeffekt der gekrümmten Empfangsfläche verstanden werden kann: Bei tiefen Frequenzen sind die Phasenunterschiede der Schallanteile, die bei Einfallrichtung parallel zur Nadelachse an unterschiedlichen Punkten der aktiven Oberfläche auftreten, gering. Diese nehmen mit zunehmender Frequenz zu. Die Überlagerung der nicht konphasen Anteile verursacht dann den mit zunehmender Frequenz beobachteten Abfall. Eine einfach rechnerische Abschätzung, bei der alle Schallanteile auf einer der äußeren Oberfläche der Beschichtung entsprechenden Kugelschale (Krümmungsradius  $250\ \mu\text{m}$ ) bis zum Grenzwinkel für Totalreflexion entsprechend ihren Phasendifferenzen summiert werden, ergibt bereits einen qualitativ ähnlichen relativen Empfindlichkeitsverlauf (Fig. 2a).

Bei konphasem Auftreffen der Schallanteile, etwa wenn die Sonde in das Zentrum einer kugelförmig konvergierenden Welle positioniert wird, die z. B. von einem PVDF-Wandler mit sphärisch gekrümmter Oberfläche [10] oder nach Reflexion einer Welle an einem geeigneten Reflektor erzeugt werden kann – entspricht die gemessene Empfangsempfindlichkeit dem Verlauf nach der im ebenen Schallfeld gemessenen Empfindlichkeit eines ebenen Wandlers. Dessen Schichtdicke kommt dann einer mittleren Beschichtungsstärke der Nadelsonde gleich. Bei  $40\ \mu\text{m}$  Beschichtungsstärke wäre daher ein Minimum im Empfangsverhalten bei etwa 28 MHz zu erwarten ( $c \approx 2200\ \text{m/s}$ ).

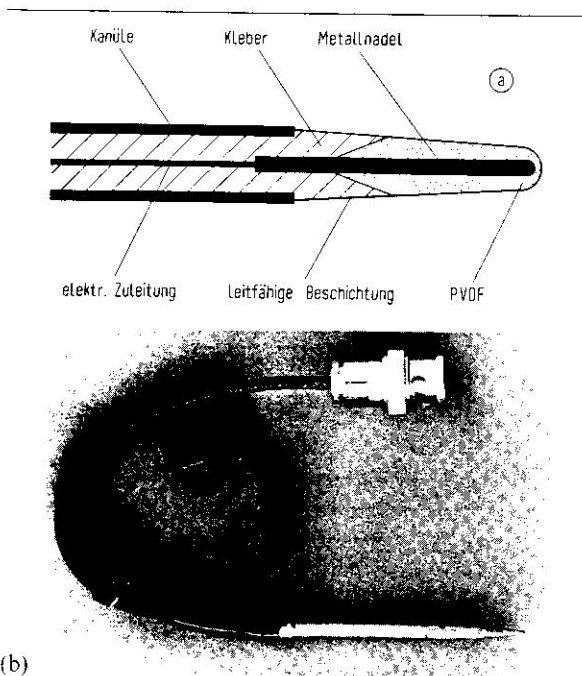


Fig. 1. Prinzipieller Aufbau der Nadelsonde (a) und Gesamtansicht (b).

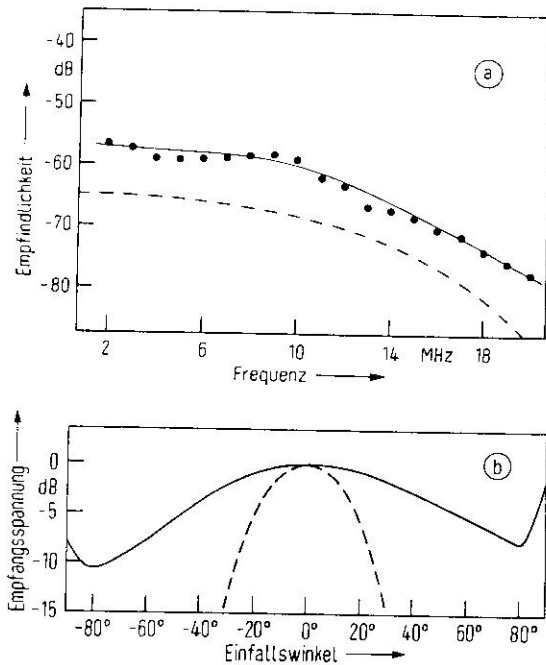


Fig. 2. a) Empfangsempfindlichkeit (in dB bezüglich 1 V/bar) einer Nadelsonde bei maximal 1 bar:

(· · · ·) Meßwert,  
 (—) gemittelter Verlauf,  
 (---) berechneter relativer Verlauf (willkürlich bei 1 MHz - 65 dB angesetzt).

b) Abhängigkeit der Empfangsempfindlichkeit von der Einfallsrichtung des Schalls bezüglich der Sondenachse (Empfangsspannung  $U$  in dB bezüglich Empfangsspannung bei 0° Einfallswinkel):

(—) Nadelsonde (gemessen),  
 (---) Sonde mit ebener Empfangsfläche von 0,3 mm Durchmesser (berechnet).

Im weiteren bewirkt die kugelsegmentförmige Empfangsfläche eine weitgehende Unabhängigkeit der Empfangsempfindlichkeit von der Einfallsrichtung des Schalls bei ebenen Wellen [11]. Fig. 2b zeigt exemplarisch die bei 10 MHz gemessene Abhängigkeit der Empfangsempfindlichkeit einer Nadelsonde von der Einfallsrichtung einer ebenen Schallwelle. Zum Vergleich ist die für eine ebene Membran von 0,3 mm Durchmesser berechnete richtungsabhängige Empfindlichkeit miteingezeichnet. Im gesamten für die hier vorgestellte Anwendung typischen Frequenzbereich besitzen die hier beschriebenen Nadelsonden gegenüber einer vergleichbaren Sonde mit ebener Empfangsfläche erheblich geringere Richtungsselektivität.

#### 4.2. Empfindlichkeit unter hoher dynamischer Belastung

Da ein monofrequentes Drucksignal hoher und variabler Amplitude nicht erzeugt werden konnte,

wird zur Überprüfung der Empfangsempfindlichkeit bei hoher Schalldruckamplitude die Sonde in einem Wasserstoßrohr Druckwellen bis maximal 320 bar ausgesetzt.

Ein hochbeschleunigter Kolben trifft mit einer Geschwindigkeit von bis zu 30 m/s auf eine Wasseroberfläche. Die bei der Kollision erzeugten Druckwellen besitzen Anstiegszeiten in der Größenordnung von 100  $\mu$ s, ein schmales Plateau von weiteren 100  $\mu$ s und einen anschließenden Exponentialabfall mit einer Zeitkonstante von 400  $\cdots$  800  $\mu$ s, je nach Kolbenmasse.

Das Ausgangssignal wird über einen Ladungsverstärker vom Typ Kistler 5007 mit sehr großer Zeitkonstante aufgezeichnet, um einen Ausgleich der Ladungsverschiebung schon während des Druckanstieges zu verhindern. Die Empfindlichkeit ergibt sich im Vergleich mit einer in direkter Nachbarschaft eingebauten Referenzdrucksonde vom Typ PCB 105A43.

Fig. 3 zeigt die Amplitude des Sondenausgangssignals als Funktion der Druckwellenspitze. Am linearen Anstieg erkennt man die konstante Empfindlichkeit über den untersuchten Druckbereich bis knapp über 300 bar. Ein ähnliches Ergebnis konnte für dünne PVDF-Folien (27  $\mu$ m) auch schon von Meeks und Ting [13] über einen Druckbereich von 0  $\cdots$  650 bar nachgewiesen werden. Sie erhielten bei Druckwellen von 650 bar mit Anstiegszeiten von 1  $\cdots$  3 ms eine Abweichung vom linearen Verlauf von weniger als 7%.

Somit ist zu erwarten, daß die Drucksonde auch bis zu diesen Werten ihr lineares Verhalten beibehält oder zumindest nur geringfügig davon abweicht. Aufgrund ihrer halbkugelförmigen Empfangsfläche und den damit verbundenen komplizier-

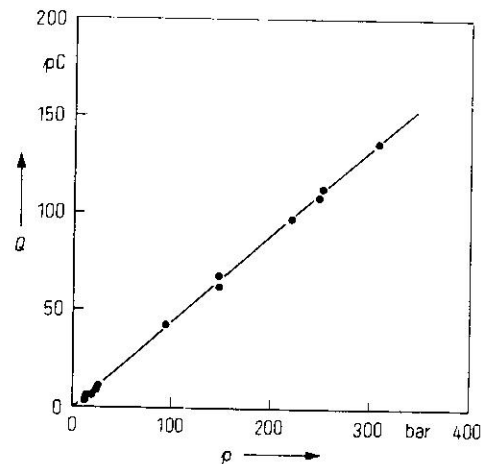


Fig. 3. Sondenausgangssignal unter hoher dynamischer Druckbelastung.

ten Reflexionsverhältnissen bei Stoßbelastung, läßt sich allerdings eine Korrelation zu der oben gemessenen Empfindlichkeit nicht explizit angeben.

Das Verhalten der Sonde unter stoßartiger Druckbelastung mit Anstiegszeiten von wenigen Nanosekunden, die bei Unterwasserexplosionen und den Fokussierungsexperimenten auftreten, wird im Schallfeld einer durch eine Unterwasserfunkenentladung erzeugten sphärischen Stoßwelle untersucht.

Nach den Gesetzen der geometrischen Akustik ist ein Abstandsgesetz für den Druckverlauf von

$$p \sim \frac{1}{\sqrt{A}} \sim \frac{1}{r} \quad (1)$$

zu erwarten, wobei  $A$  die Oberfläche der momentanen kugelförmigen Druckfront und  $r$  den Abstand vom Explosionszentrum darstellt.

Das maximale Ausgangssignal der Drucksonde, bezogen auf das Signal im Abstand  $r = 100$  mm vom Auslösezentrum mit einer Schalldruckamplitude von  $\hat{p}_{100} = 40$  bar ist in Fig. 4 aufgetragen. Geringe Abweichungen vom Abstandsgesetz ergeben sich bei dieser Auftragung durch die bei der zunehmenden Aufsteilung der Wellenfronten wachsenden Absorptionsverluste. Ansonsten wird die erwartete Hyperbelfunktion durch die Messungen gut bestätigt, was auf eine konstante Empfindlichkeit auch bei stoßartiger Belastung schließen läßt.

Dieses Resultat ermöglicht somit eine Eichung bei relativ geringen Druckamplituden, wie sie sich im Fernfeld einer Unterwasserexplosion ergeben. Eine im Luftstoßrohr geeichte PVDF-Stabdruks-sonde großer Empfindlichkeit und weiten Frequenzbereichs mit einem empfindlichen Durchmesser von  $d = 4$  mm dient im Fernfeld der sphärischen Stoß-

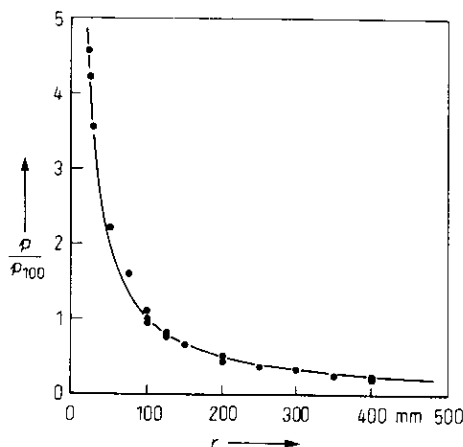


Fig. 4. Druck im Abstand vom Auslösezentrum einer sphärischen Stoßwelle in Wasser, bezogen auf den Druck bei  $r = 100$  mm;  $\hat{p}_{100} = 40$  bar:  
(—)  $p = \text{const.}/r$ , (●●●) Experiment.

welle als Referenzdrucksonde. Die noch vorhandene Stoßkrümmung ist in diesem Fall relativ zur gesamten Pulsbreite vernachlässigbar. — Die Empfindlichkeiten der Nadel-Drucksonden schwanken demnach von Sonde zu Sonde zwischen 0,05 und 0,25 pC/bar. Die relativ große Spannbreite ergibt sich naturgemäß durch die individuelle Herstellungsweise sowie durch nur schlecht reproduzierbare Polarisationen. Folglich muß jede Sonde einer für ihre Anwendungszwecke spezifischen Eichung unterzogen werden.

### 5. Sondenverhalten bei Unterwasserexplosionen

Der zeitliche Druckverlauf in genügend großer Entfernung vom Explosionszentrum läßt sich näherungsweise durch folgenden Exponentialimpuls beschreiben:

$$p(t) = \hat{p} e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Dabei bedeuten  $p$  der Druck,  $\hat{p}$  der Spitzendruck und  $\tau$  die Zeitkonstante, bis zu der der Druck auf  $1/e$  des Spitzendrucks abgefallen ist.

Da die Drucksonde nicht nur zur Amplitudenmessung, sondern auch zur Erfassung schneller Druckänderungen dienen soll, wird das qualitative Sondenverhalten in einem nach der linearen Akustik zu erwartenden Druckfeld untersucht. Die Sonde wird dazu 100 mm vom Entladungszentrum montiert. Ihre Tauchtiefe sowie die der Funkenstrecke beträgt 50 mm. Die Gesamtlänge des Anschlußkabels beträgt dabei 6 m. — Der Druckverlauf, der von der Sonde nach der Explosion registriert wird, kann dem Oszillogramm der Fig. 5a entnommen werden. Die von der einfallenden Stoßwelle frontal getroffene Sonde erzeugt ein Ausgangssignal, das in guter Übereinstimmung mit dem zu erwartenden Exponentialimpuls steht. Die auf der abfallenden Flanke angezeigten geringen Schwankungen sind durch die Anordnung der Funkenstrecke gegeben und werden auch bei Schlieren- bzw. Schattenaufnahmen beobachtet.

Ca.  $28 \mu\text{s}$  später erreicht die an der Wasseroberfläche reflektierte Welle die Sonde. Durch die Reflexion an einem akustisch weicherem Medium ( $\rho_L c_L \ll \rho_w c_w$ ) erfährt die Stoßwelle eine Phasenumkehr und wird als Zugwelle reflektiert. Der längere Laufweg dieser Welle sowie der schräge Einfall gegenüber der Sonde bewirken ein geringeres negatives Ausgangssignal.

Eine unter gleichen Bedingungen belastete Drucksonde vom Typ PCB 105A43 mit einem Meßbereich von  $0 \dots 2170$  bar erzeugt demgegenüber ein Ausgangssignal, wie in Fig. 5b dargestellt. Nach einer

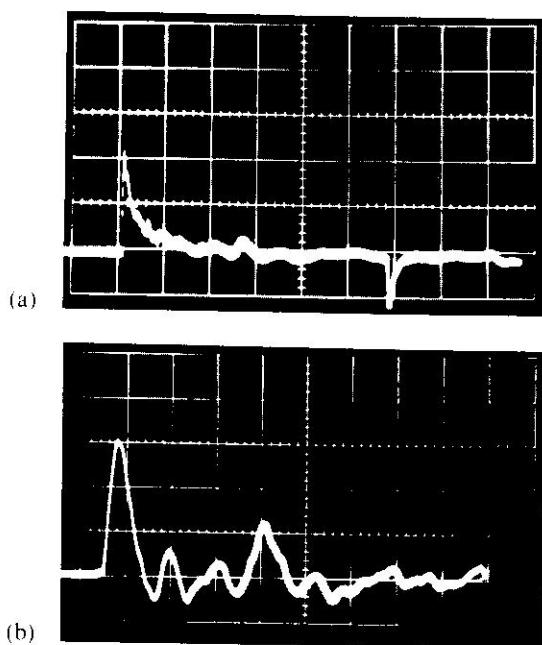


Fig. 5. Vergleich der Nadelsonde (a) mit dem Druckaufnehmer vom Typ PCB 105A43 (b) (2,5 mV/bar) bei Frontalbeaufschlagung durch eine Kompressions- und anschließende Expansionswelle in Wasser; horiz.: 5  $\mu$ s/Skt; vert.: a) 20 mV/Skt, b) 100 mV/Skt.

Anstiegszeit von knapp 2  $\mu$ s, entsprechend den Angaben des Herstellers, geht die Sonde in den weiteren zeitlichen Verlauf in eine charakteristische Eigenschwingung über. Das Eintreffen der Expansionswelle wird von dieser Sonde nicht mehr angezeigt.

Der Vergleich macht deutlich, daß Drucksonden mit Anstiegszeiten im Bereich von Mikrosekunden bzw. relativ geringen Resonanzfrequenzen (< 1 MHz) für die Untersuchung von Unterwasserexplosionen kurzer Zeitdauer nicht geeignet sind. Derartige Sonden können dem äußerst schnellen und kurzen Signal nicht folgen, was im allgemeinen zu zu kleinen Ausgangssignalen aber auch bei schwacher Dämpfung zum Überschwingen führt.

### 5.1. Messungen an konvergierenden Stoßwellenfronten

Als Beispiel für den Einsatz der Nadel-Sonden sei die Untersuchung eines konvergierenden Stoßwellensystems aufgezeigt. Untersuchungsgegenstand ist ein Segment eines Ellipsoids mit einem Achsenverhältnis von 1:1,13 (Fig. 6). Ein Teil der im ersten Brennpunkt  $F_1$  freigesetzten Energie in Form einer Funkenentladung trifft das Ellipsoidsegment als sphärische Welle und wird im zweiten Brennpunkt  $F_2$  wieder konzentriert. Das Auslösezentrum befindet sich  $l = 359$  mm vom Scheitelpunkt des Ellipsoids entfernt. Der Durchmesser des Reflektors beträgt 195 mm.

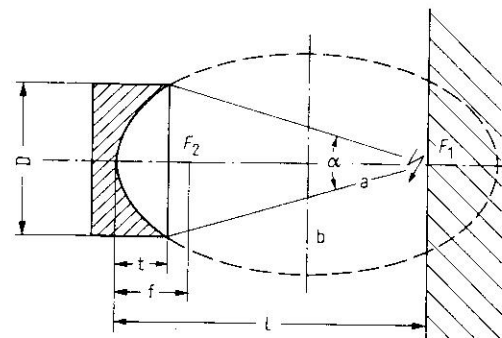


Fig. 6. Mittelschnitt der Versuchsanordnung. Reflektorparameter:

$a = 244$  mm;  $b = 216$  mm;  $l = 359$  mm;  $t = 26,3$  mm;  
 $f = 130$  mm;  $D = 195$  mm und  $\alpha = 32,7^\circ$ .

Der Druckverlauf des reflektierten Anteils wird an zahlreichen Punkten sowohl auf der Rotationsachse, wie auch senkrecht dazu entlang den Fronten, wie sie sich nach der Auswertung schattenoptischer Aufnahmen ergeben, vermessen. Eine Auswahl dieser Meßpunkte ist in Fig. 7 eingezeichnet. Zur Verdeutlichung des zeitlichen Stoßwellenverlaufs ist zu drei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten die Lage der Stoßfront eingezeichnet. Die durch die Beugung der Kompressionswelle um die Reflektorkante nach innen laufende Expansionswelle ist gestrichelt angedeutet.

Das linke mittlere Oszillogramm zeigt den Druckverlauf im Scheitelpunkt im Falle des nicht vorhandenen Reflektors. Die Amplitude der einfallenden Stoßwelle ergibt sich danach zu 11 bar. Während 2/3 der Druckamplitude nach etwa 50 ns erreicht werden, beträgt die Gesamtanstiegszeit ca. 250 ns; s. a. [14]. Der sich anschließende Exponentialabfall der Explosionswelle besitzt eine Zeitkonstante von annähernd 3  $\mu$ s.

Die oberen Oszillogramme beschreiben den Verlauf entlang der Rotationsachse. Man erkennt deutlich die beträchtliche Zunahme der Amplitude bis zum Fokus. Im Brennpunkt hat sich die Front zu einem extrem hohen und äußerst schmalen Spitzendruck aufgestellt. Die Anstiegszeit beträgt weniger als 50 ns, die Fußbreite des Pulses ist auf etwa 400 ns zusammengeschmolzen. Der Druck hat sich relativ zur Amplitude auf der Reflektoroberfläche in diesem Beispiel um das 54fache verstärkt, einem Fokusdruck von 600 bar entsprechend. Die von der Reflektorkante ausgehende Expansionswelle wird als negativer Ausschlag aufgezeichnet und schließt gegenüber der voreilenden Kompressionswelle mehr und mehr auf.

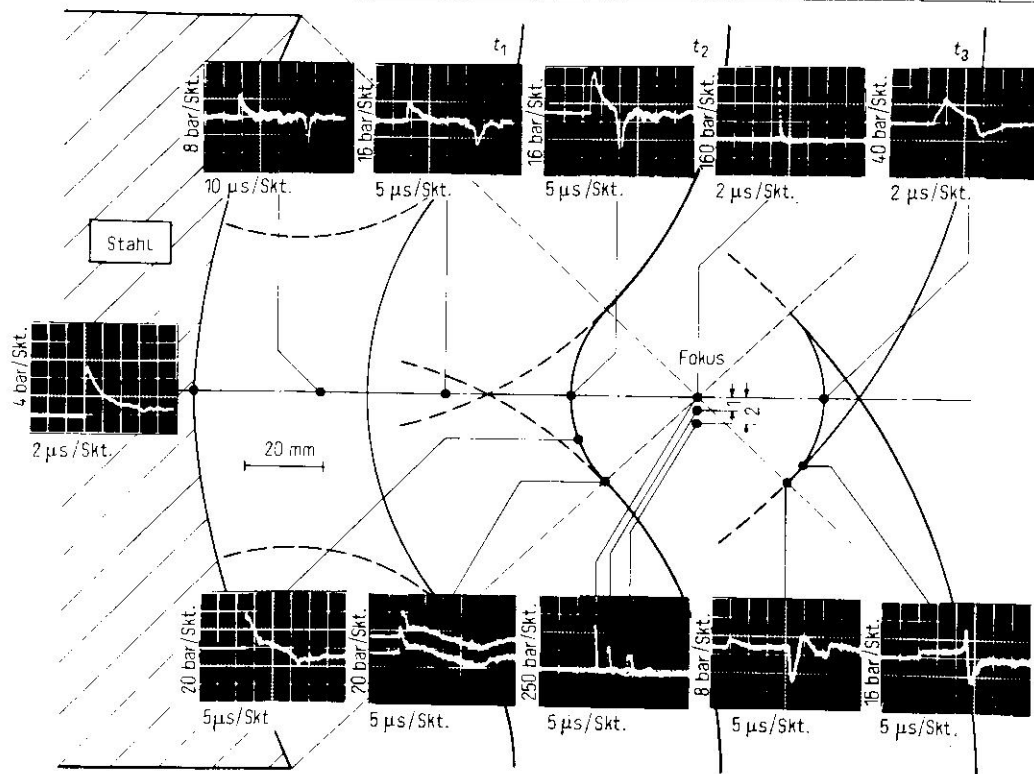


Fig. 7. Druckverlauf im Mittelschnitt einer dreidimensionalen konvergierenden Stoßfront nach Reflexion an einem Ellipsoidreflektor entsprechend Fig. 6, Kondensatorenergie  $E_c = 62 \text{ J}$ .

Die unteren Aufnahmen geben die Druckverläufe senkrecht zur Ellipsoidachse wieder. Im mittleren Bild wurde der Druck in geringem Abstand neben dem Fokuspunkt gemessen. 1 mm neben der optischen Achse beträgt die Amplitude nur noch knapp 60% des Fokusdruckes, 2 mm seitlich sogar nur noch etwa 35%. Dies macht die Notwendigkeit einer Miniaturdrucksonde für Untersuchungen dieser Art deutlich. Aufnehmer mit einem empfindlichen Durchmesser von nur wenigen Millimetern würden den Druck nur noch als integrierten Mittelwert anzeigen, der beachtlich vom wahren Wert abweicht.

Vergleiche dieser Versuchsreihe mit ähnlichen Experimenten, die von Holl [5] in Luft unter Verwendung des Druckaufnehmers 603B von Kistler durchgeführt wurden, zeigen qualitativ sehr gute Übereinstimmung mit den vorliegenden Ergebnissen.

### 6. Schlußbemerkung

Durch eine sehr dünne Beschichtung einer leicht abgerundeten Stahlnadel mit aufgeschmolzenem

PVDF sowie anschließender Polarisation der Beschichtung gelingt es, einen Miniaturdruckaufnehmer geringer Richtungsempfindlichkeit herzustellen. Die geringe Anstiegszeit sowie die robuste Bauweise dieser Nadelsonde ermöglichen den Einsatz bei Untersuchungen von Unterwasserexplosionen mit Stoßdruckamplituden bis in den Bereich von 1 kbar.

Die Druckmessungen im Brennpunktbereich verdeutlichen aber auch, daß eine noch weitergehende Miniaturisierung wünschenswert wäre. Erste Versuche dazu wurden mit Stabdruksonden von  $100 \mu\text{m}$  Durchmesser, deren Stirnseiten mit einer  $9 \mu\text{m}$  dicken piezoelektrisch polarisierten PVDF-Folie versehen waren, durchgeführt. Im bisherigen experimentellen Aufbau wurden bei diesem Sondentyp aufgrund der äußerst geringen Anstiegszeiten von nur etwa 10 ns bereits in störender Weise Reflexionen im Sondenkabel zwischen Aufnehmer und hochohmigen Oszillographeneingang sichtbar. Ziel der weiteren Arbeit wird daher die Verbesserung und Anwendung der bereits jetzt vielversprechenden Sondentechnik auf PVDF-Basis sein.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 27 „Wellenfokussierung:

Aufteilung und Fokussierung mechanischer Wellen" durchgeführt. Die gute Zusammenarbeit der Institute sowie die Anregungen aus der Industrie trugen wesentlich zur Förderung der Arbeiten bei.

Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Grönig und Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Kuttruff für ihr förderndes Interesse und ihre hilfreichen Diskussionen sowie die Durchsicht des Manuskripts.

(Eingegangen am 28. Dezember 1984.)

#### Literatur

- [1] Chaussy, Ch., Forßmann, B., Brendel, W., Jocham, D., Eisenberger, F., Hepp, W. und Gokel, J. M., Berührungsfreie Nierensteinzertrümmerung durch extrakorporal erzeugte, fokussierte Stoßwellen. Beiträge zur Urologie, Bd. 2, Karger Verlag 1980.
- [2] Eisenmenger, W., Experimentelle Bestimmung der Stoßfrontdicke aus dem akustischen Frequenzspektrum elektromagnetisch erzeugter Stoßwellen in Flüssigkeiten bei einem Stoßdruckbereich von 10 atm bis 100 atm. *Acustica* **14** [1964], 187.
- [3] PCB Piezotronics, Inc. Buffalo, New York, Datenblatt des Druckaufnehmers PCB 105A43.
- [4] Kistler Piezo Meßtechnik, Winterthur, Schweiz, Datenblatt des Druckaufnehmers 603B.
- [5] Krehl, P., Measurement of low shock pressures with piezoresistive carbon gauges. *Rev. Sci. Instrum.* **49** [1978], 1477.
- [6] Bacon, D. R., Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1...100 MHz. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* **SU-29** [1982], 18.
- [7] Lewin, P. A., Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes. *Ultrasonics* **19** [1981], 213.
- [8] Wilson, D. T., Tancrell, R. H. und Callerame, J., PVDF polymer microprobe. *Proc. IEEE Symp. Ultrasonics 79*, CH 1482-9, SU 1979, p. 506.
- [9] Lovik, A., Measurement of high frequency waveforms in water. Fortschritte der Akustik FASE/DAGA '82, DPG-Gmk, Bad Honnef 1982.
- [10] Platte, M., Ultraschallwandler aus Polyvinylidendifluorid mit breitbandigem Übertragungsverhalten und fokussierenden Eigenschaften. *Acustica* **54** [1983], 23.
- [11] Platte, M., Polyvinylidenefluoride needle hydrophone for ultrasonic applications. Submitted to *Ultrasonics*.
- [12] Benetschik, P. und Müller, M., Entwurf einer Miniaturdrucksonde zur Messung von Stoßdrücken in Wasser mit Anstiegszeiten im Nanosekundenbereich. Studienarbeit, Stoßwellenlabor RWTH Aachen 1984.
- [13] Meeks, S. W. und Ting, R. Y., Effects of static and dynamic stress on the piezoelectric and dielectric properties of PVDF. *J. Acoust. Soc. Amer.* **74** [1983], 1681.
- [14] Bailitis, E., Der Schallimpuls eines Flüssigkeitsfunken. *Z. f. angew. Physik einschl. Nukleonik* **9** [1957], 429.
- [15] Holl, R., Wellenfokussierung in Fluiden. Dissertation, Stoßwellenlabor RWTH Aachen 1982.