

Methoden der Stosswellenerzeugung und -messung

W.Eisenmenger

1.Physikalisches Institut der Universität Stuttgart

Grundlagen

Stoßwellen, Schlagwellen oder Knallwellen sind Druckwellen hoher Amplitude, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit aufgrund von Nichtlinearitäten des Mediums übersteigt. Sofern nicht schon bei der Erzeugung der Stoßwelle, z.B. durch Detonation, der Druckanstieg als steile Wellenfront vorliegt, entsteht eine steile Stoßfront auch während der Ausbreitung einer Überdruckwelle als Folge der Aufsteilung aufgrund des Anstiegs der Schallgeschwindigkeit mit wachsender Amplitude.

Während die Physik und Technik der Stoßwellen in Gasen ein umfangreiches und weit erforschtes Gebiet darstellt, hat die Stoßwellenausbreitung in Flüssigkeiten in jüngerer Zeit durch die medizinische Anwendung bei der extrakorporalen Steintherapie bei /1/, /2/ besonderes Interesse gefunden.

Bei dieser neuen Methode werden Stoßwellen oder auch zunächst nur Druckwellen fokussierend in Wasser abgestrahlt, über eine Koppelmembran oder auch, bei direktem Kontakt, in den Körper des Patienten eingeleitet und bei weiterer Ausbreitung im Gewebe auf den zu zerkleinernden Stein fokussiert. Für die Zertrümmerungswirkung werden sowohl die durch den steilen Druckanstieg im Stein erzeugten Druck und Schubspannungen als auch die nach der Reflexion der durchlaufenden Welle entstehenden Zugspannungen (Abplatzeffekt), vergl. /1/, /2/, verantwortlich gemacht. Kürzlich wurde jedoch auch die Wirkung der Kavitation durch Unterdruckanteile der Welle bei der Gallensteinzertrümmerung /3/ nachgewiesen. Ebenso ist zu vermuten, daß Schmerzentstehung und gelegentliche Gewebsschädigung auf unterdruckbedingte Kavitation zurückzuführen sind.

Somit kommt neben der Stoßwelle selbst, d.h. dem positiven Teil der Druckwelle auch negativen Druckanteilen im Gefolge des Überdruckes eine besondere Bedeutung zu. Diese negativen Druckanteile im Feld der fokussierten Welle können für den linearen akustischen Fall grundsätzlich /4/ nicht vermieden werden. Selbst wenn in einem definierten Querschnitt, z.B. an der Generatoroberfläche, ein reiner Überdruckpuls vorliegt, treten bei der weiteren Ausbreitung im Anschluß an den Überdruckpuls negative Druckanteile durch Randbeugungswellen auf, wobei das gesamte Druckintegral an jeder Stelle des Wellenfeldes, d.h. auch im Brennpunkt verschwindet. Dort ist das Resultat der Beugungsrechnung beson-

ders einfach, da der resultierende Druck im Brennpunkt der zeitlichen Ableitung der ursprünglichen, d.h. erregenden Druckfunktion entspricht, vergl. /4/. Einem steilen Druckanstieg und langsamen Druckabfall im erzeugenden Querschnitt entspricht somit eine kurze, hohe, positive Druckspitze im Fokus mit einem nachfolgenden langen, jedoch schwachen negativen Druckpuls.

Bei einem zeit-symmetrischen Druckverlauf im erzeugenden Querschnitt /4/ ergibt sich eine anti-symmetrische Druckfunktion im Fokus, d.h. dem Überdruckpuls folgt unmittelbar ein entgegengesetzt gleich hoher Unterdruckpuls. Sofern Kavitation für die Steinzertrümmerung wesentlich ist /3/, kann die Stärke des kavitationsauslösenden Unterdruckimpulses somit leicht durch die Pulsform im erzeugenden Generatorquerschnitt eingestellt werden.

Ein weiterer einfacher und interessanter Grenzfall betrifft die Druckzeitfunktion auf der Generatorachse zum Fokus. Hier trifft die Randbeugungswelle jeweils später ein als das direkte Signal. Da die Laufzeit vom Rand zur Achse jedoch einen einheitlichen Wert besitzt, ist das Signal der Randbeugungswelle entgegengesetzt gleich groß zur direkten Welle. Dies folgt aus der bereits genannten Bedingung, daß das gesamte Druck-Zeit-Integral verschwindet.

Auf einen kurzen direkten Überdruckimpuls folgt daher ein entgegengesetzt gleicher Unterdruckimpuls. Letzterer führt zu Kavitation mit möglichen Nebenwirkungen. Eine Reduzierung der achsennahen Amplitude der Randbeugungswelle gelingt durch eine radial abnehmende Anregungsamplitude (Randabschattung) /4/ im erzeugenden Querschnitt, d.h. einer Verteilung der Randbeugungswelle auf ein möglichst großes Laufzeitintervall.

Diese Aussagen gelten zunächst für den Bereich der linearen Akustik. Auch bei Berücksichtigung der endlichen Druckamplituden und der Entstehung von Stoßwellen, bilden die linear-akustischen Lösungen jedoch weitere wichtige Näherungen. Hinsichtlich des meßbaren Unterdrucks treten jedoch durch Kavitation starke Abweichungen gegenüber der akustischen Näherung auf, da durch das kavitationsbedingte Aufreißen der Flüssigkeit der Unterdruckanteil stark geschwächt wird.

Auch hier kann jedoch durch Reduktion der Unter-

druckwelle, d.h. Randabschattung, die Kavitation mit den entsprechenden Nebenwirkungen reduziert werden.

Erzeugung von Stoßwellen in Flüssigkeiten

Stoßwellen höchster Amplitude entstehen in Flüssigkeiten durch Detonation /5/. Bei Verwendung von Zündpillen, vergl. /6/, ist auch die Erzeugung von Kugelstoßwellen im Labormaßstab möglich. Weitgehend vergleichbar hiermit ist die Unterwasserfunkenentladung, vergl. /7/, die schon frühzeitig zur Materialverformung eingesetzt wurde. Bei der Fokussierung der Kugelstoßwellen mit einem Ellipsoidreflektor können im zweiten Fokus leicht Drucke im Kilobarbereich erzielt werden. Diese Methode führte erstmalig zur erfolgreichen extrakorporalen /8/ Stoßwellenlithotripsie.

Als mechanische Methoden zur Stoßwellenerzeugung in Flüssigkeiten, vergl. /9/, werden u.a. Gas-Membranstoßrohre eingesetzt, um zunächst eine Gas-Stoßwelle zu erzeugen, deren Druck sodann über Reflexion auf eine Flüssigkeitssäule übertragen wird. Ebenso können Membranstoßrohre auch direkt zur Erzeugung von Stoßwellen in Flüssigkeiten /10/ verwendet werden. Schließlich ist auch der direkte Kolbenschlag, vergl. /9/, oder der Wasserschlag (analog dem hydraulischen Wider) zur Stoßwellenerzeugung geeignet. Allerdings besitzen sämtliche der bisher genannten Methoden den Nachteil einer vergleichsweise geringen Reproduzierbarkeit.

Dies ist nicht der Fall bei der piezoelektrischen und der elektromagnetischen Stoßwellenerzeugung.

Im piezoelektrischen Fall wird an eine Piezokeramikplatte oder eine entsprechende kalottenförmige Anordnung ein elektrischer Spannungssprung angelegt. Hieraus resultiert ein momentaner mechanischer Spannungszustand /11/, der zu Entlastungswellen führt, die sich von der Generatoroberfläche in die Piezokeramik ausbreiten und gleichzeitig mit der Abstrahlung einer Druckwelle in die angrenzende Flüssigkeit verbunden sind. Durch mechanische Anpassung auf der flüssigkeitsabgewandten Seite ist die Abstrahlung eines reinen Überdruckpulses im erzeugenden Querschnitt möglich. Im Fokus entsteht somit ein positiver Überdruckpuls mit nachfolgendem Unterdrucksignal. Bei genügend hoher Druckamplitude erfolgt eine Aufsteilung zur Stoßwelle auf dem Weg zum Fokus. Stoßwellengeneratoren für medizinische Anwendungen sind aus mehreren 1000 Piezokeramikelementen zusammengesetzt und besitzen Durchmesser von 60 cm, um im Fokus Drucke bis zu 1 kbar bei Pulsdauern von etwa 0,5 μ s erzeugen zu können. Durch eine geeignete elektrische Ansteuerung ist es möglich, den Unterdruckanteil im Fokus zu reduzieren, vergl. /1/, /2/.

Bei der elektromagnetischen Erzeugung von Stoßwellen in Flüssigkeiten werden die starken, abstoßenden, magnetischen Kräfte zwischen zwei von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossenen Leitern ausgenutzt. Die entsprechende Anordnung /12/ besteht aus einer spiralförmig gewickelten Flachspule, vor der sich in geringem Abstand eine dünne Kupfermembrane befindet. Wird ein Hochspannungskondensator mittels Schaltfunkenstrecke über die Flachspule entladen, so induziert der entstehende starke Stromstoß einen entgegengesetzt gerichteten Kreisstrom (Wirbelstrom) in der Kupfermembrane. Diese erfährt hierdurch kurzzeitig eine starke Abstoßung, so daß in die angrenzende Flüssigkeit

eine Druckwelle abgestrahlt wird. Aufgrund der Nichtlinearität der Wellenausbreitung steilt sich deren Wellenfront bis zur Ausbildung einer Stoßfront mit einer Anstiegszeit von etwa 1 ns /12/, /13/ bei 50 bar Stoßdruck in Wasser auf. Mit einer entsprechenden Anordnung zur Erzeugung von ebenen Stoßwellen im Stoßrohr von 50 mm ϕ können je nach Spulen- und Kondensatoranordnungen Stoßdrucke bis zu einigen 100 bar und Dauern von 0,5 - 10 μ s ohne Fokussierung erzeugt werden. Aufgrund der sehr guten Reproduzierbarkeit wurden Messungen der stationären Stoßfrontdicke /13/ als Funktion des Stoßdruckes durchgeführt, wobei sich in einem weiten Druckbereich Übereinstimmung mit den unter Berücksichtigung der Ultraschallabsorption und der Nichtlinearitätskonstanten B/A, vergl. /13/, /14/, berechneten Stoßfrontdicke ergab.

Druckverlauf und Amplitude können bei einem elektromagnetischen Stoßwellengenerator einfach aus dem gemessenen elektrischen Stromsignal /12/ berechnet werden. Wegen der großen Druckreserven wird durch Fokussierung mit einer akustischen Linse auch die elektromagnetisch erzeugte Stoßwelle erfolgreich für die Zertrümmerung von Konkrementen /1/, /2/ eingesetzt, wobei der Generatordurchmesser von ca. 12 cm nur so groß sein muß, wie es durch den kleinstmöglichen Abstand zum Konkrement von etwa 12 cm, z.B. einem Nierenstein, und dem Öffnungswinkel von mindestens 60° erforderlich ist. Eine genaue Analyse /12/ zeigt, daß der akusto-elektrische Wirkungsgrad des elektromagnetischen Generators reziprok zur Generatorfläche zunimmt, d.h. eine möglichst kleine Generatorfläche von Vorteil ist.

Statt mit einer Linsenfokussierung kann der elektromagnetische Generator auch in Kalottenform /15/, d.h. selbstfokussierend aufgebaut werden. In diesem Fall erfolgt die Wellenaufsteilung auf dem Weg zum Fokus. Überraschenderweise beobachteten wir bei Modellexperimenten /16/ mit Phantomsteinen eine nennenswerte Zertrümmerungswirkung auch ohne voll ausgebildete Stoßfront im Fokus. Dies kann sowohl auf Kavitationseinwirkung durch stets vorhandenen Unterdruckanteil als auch auf die direkte mechanische Einwirkung der Druckwelle mit endlicher Steilheit zurückzuführen sein. Scherspannungen und "Zug"-wellen (durch Reflexion im Stein bei Wellenaustritt), die eine starke Steinbeanspruchung darstellen, sind an die Bedingung geknüpft, daß die Wellenanstiegszeit kurz ist gegenüber der Laufzeit im Stein. Eine voll ausgebildete Stoßfront ist daher besonders wichtig, wenn Steinbruchstücke weiter zu zerkleinern sind. Bei früheren Druckmessungen mit piezokeramischen Sondenhydrophonen /17/ ergab sich bei Druckpulsen von 100 bar eine sehr hohe Sondenlebensdauer, sobald jedoch die selben Druckpulse nach einem Laufweg von 15 cm durch Aufsteilung eine scharfe Stoßfront entwickelt hatten, wurden die Hydrophone schon durch etwa drei Expositionen zerstört.

Hinsichtlich der Wirkung des Unterdrucks und der Kavitation im Fokus, müssen die Gesichtspunkte berücksichtigt werden, daß einerseits die Kavitation zur Steinertrümmerung beiträgt /3/, andererseits auch zu Gewebsverletzungen, vergl. /18/, führen kann. Hier ermöglicht der elektromagnetische Generator durch geeignete Wahl der zeitlichen Form des Generatorstroms, vergl. /4/, und damit des primären Druckimpulses eine Einstellung der jeweils gewünschten Pulsformen im Fokus.

Zur Reduktion der Unterdrucksignale auf der Achse zum Fokus kann das bereits grundsätzlich beschriebene Verfahren der Randabschattung durch entsprechende Spulenabgriffe am elektromagnetischen Generator /4/ realisiert werden.

Die beschriebenen Stoßwellengeneratoren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Fokusabmessungen. Dies ist durch unterschiedliche Öffnungswinkel und Pulsdauern bedingt. Kleine Fokusabmessungen von etwa 5 mm \varnothing werden bei großer Öffnung und kurzer Generatorpulsdauer (piezoelektrisches System) beobachtet /27/, während bei Unterwasserfunken- und elektromagnetischen Generatoren infolge geringer Öffnung und längerer Generatorpulsdauer Fokusdurchmesser von bis zu 20 mm auftreten. Wegen der geringen Gesamtenergie der akustischen Pulse des piezoelektrischen Generators ist die stärkere Fokussierung bei der Steinertrümmerung unbedingt erforderlich. Andererseits sind bei geringerer Gesamtenergie und großer Öffnung kavitationsbedingte Schmerzwirkungen, insbesondere an der Hautoberfläche im Eintrittsbereich vermeidbar, vergl. auch /28/.

Stoßwellenmeßmethoden

Die Bestimmung von Stoßwellendruck- oder Schnellamplituden in Flüssigkeiten erfordert infolge der großen Pulsdauer und der gleichzeitig extrem kurzen Anstiegszeiten in der Stoßfront eine große Hydrophonbandbreite. Außerdem sind die Hydrophone der zerstörenden Wirkung der Stoßwelle selbst durch induzierte Scher- und Zugspannungen sowie ebenso der zerstörenden Wirkung der durch die nachfolgende Unterdruckwelle bedingten Kavitation ausgesetzt.

Diese Nachteile können z.B. durch direkte Erfassung der sich unter Druck ändernden optischen Brechungseigenschaften der Flüssigkeiten vermieden werden. Hier wird schon seit langer Zeit die schlierenoptische Abbildung eingesetzt. Allerdings ist eine quantitative schlierenoptische Druckbestimmung außerordentlich schwierig. Demgegenüber ermöglicht eine neue optische Glasfaser-Hydrophonanordnung /19/ die unkomplizierte und sichere Bestimmung von kurzzeitigen Dichteänderungen in Flüssigkeiten und damit von kurzzeitigen Drucksignalen.

Gegenüber dieser neuen Methode der Druckmessung ist der Einsatz piezoelektrischer Hydrophone trotz begrenzter Lebensdauer bei hohen Stoßdrücken weit verbreitet.

"Flächenhafte" piezoelektrische Hydrophone

Höchste Zeitauflösung verlangt geringste Detektorabmessungen. Sofern die Stoßwelle eben ist, bzw. einen genügend großen Krümmungsradius besitzt, kann die Detektion "flächenhaft" erfolgen. Dies soll in einfacher Weise für den Fall eines dicken Piezokristalls diskutiert werden, vergl. /12/, /13/. Bei senkrechtem Auftreffen eines Drucksignals oder eines Stoßwellen-Drucksprunges auf den ebenen Piezokristall, wird bei der Reflexion eine Longitudinalwelle mit steiler Front in den Kristall abgestrahlt.

Infolge des Piezoeffekts sind mit den Fronten des Drucksprunges Polarisationsladungen verknüpft, die sich mit Schallgeschwindigkeit durch den Kristall bewegen. Bei geeigneter kapazitiver Auskopplung und niederohmigem Abschluß beeinflussen die bewegten Polarisationsladungen Stromsignale deren Zeitverlauf ein getreues Abbild des akustischen Drucksprunges ist. Da für die Zeitauflösung allein

die Kristall-Vorder- oder Rückseite verantwortlich ist, bezeichnet man diese Methode auch als Oberflächenabtastung bzw. Vorderseiten- oder Rückseitenabtastung. Die obere Frequenzgrenze ist hierbei durch die Parallelität der Kristalloberfläche gegenüber der Wellenfront bzw. der Größe des Krümmungsradius der Wellenfront gegenüber dem effektiven Durchmesser der Vorder- oder Rückseitenabtastung gegeben. Mit dieser Methode wurden die Anstiegszeiten in der Stoßfront /13/ mit hoher Genauigkeit, d.h. einer Zeitauflösung besser als 0,1 ns bestimmt. Während diese piezoelektrische Methode zu hohen Frequenzen hin prinzipiell nur durch den Atomabstand im Kristall begrenzt ist, d.h. max. ca. 10^{13} Hz, ergibt sich eine Auflösungsgrenze bei tiefen Frequenzen durch die einfache Laufzeit im Kristall. Bei 5 mm Kristalldicke resultiert hieraus für eine Quarzscheibe eine untere Frequenzgrenze entsprechend der maximalen Pulsdauer von 1 μ s. D.h. eine möglichst hohe Bandbreite auch zu tiefen Frequenzen hin verlangt bei dieser Methode, die das Einschwingverhalten piezoelektrischer Platten ausnutzt, möglichst dicke Kristalle.

Im Gegensatz zum Prinzip der piezoelektrischen Vorderseiten- oder Rückseitenabtastung durch Strommessung, wird bei den bekannteren piezoelektrischen Hydrophonen das durch Kompression entstehende Spannungssignal gemessen. Aus diesem Grund darf ein Hydrophon großer Bandbreite nur geringe Ausdehnungen besitzen. Bei ebenen Wellen und guter Paralleljustierung zwischen Hydrophon und Welle, kann eine piezoelektrische Schicht in Form einer dünnen Kristallplatte, vergl. /20/, oder einer piezoelektrischen Polymerfolie (PVDF) direkt auf den Innenleiter einer Koaxialleitung geklebt werden, wobei die Gegenelektrode z.B. durch eine Leitsilberschicht oder als Metallbedampfung gebildet wird. Diese Hydrophone besitzen hohe Empfindlichkeit, zeigen jedoch wegen des endlichen Druckmessers des empfindlichen Elements und der Koaxialleitung eine scharfe Richtcharakteristik sowie Störungen der Pulsantwort (Schwankungen des Frequenzgangs) durch Randbeugung und Reflexionen. Diese Störungen werden bei dem Membranhydrophon /21/ vermieden. Anstelle eines flachen Piezoelements mit kleinem Durchmesser am Ende einer elektrischen Zuleitung ist bei diesem Hydrophon eine kreisförmige PVDF-Folie von wenigen μ m Dicke in einen ringförmigen Rahmen von etwa 10 cm Durchmesser eingespannt. Die Folie wird lediglich im Zentrum in einem Bereich von etwa 0,5 mm Durchmesser polarisiert. Zuleitungen und Abschirmung werden als Metall-aufdampfschichten ausgeführt. Wegen der verhältnismäßig guten akustischen Anpassung von PVDF an Wasser und wegen der sehr geringen Beugungs- und Reflexionsfehler durch Zuleitungen und Einspannung besitzen Membranhydrophone eine große Bandbreite von 0 - 30 MHz (minimal Anstiegszeit ca. 10 ns). Die Empfindlichkeit liegt im Bereich von 3 mV/bar. Unter Stoßwellenbedingungen werden nach längerer Zeit die metallischen Zuleitungsbahnen durch Kavitation zerstört. Ein Nachteil dieses Hydrophons ist seine beträchtliche Größe.

Neben piezoelektrischen flächenhaften Hydrophonen können Stoßwellenmessungen auch mit Hilfe des elektrodynamischen Prinzips /11/ (Bändchenmikrophon) oder auch des elektrostatischen Prinzips bei Reflexion der Stoßwelle an einer Grenzfläche erfolgen. Insbesondere die elektrostatische Messung an der freien, die Stoßwelle reflektierenden Grenzfläche /23/ besitzt den Vorteil großer Bandbreite, der

einfachen Möglichkeit der absoluten Eichung unabhängig von anderen Druckstandards sowie der unbegrenzten Lebensdauer unter Stoßwellenbedingungen. Ein solches Hydrophon besteht aus einer Elektrode, die sich in geringem Abstand unmittelbar über der mit einer dünnen metallisierten Membran abgedeckten Flüssigkeitsoberfläche befindet. Diese Elektrode wird über einen Vorwiderstand auf etwa 50 Volt Vorspannung gebracht und mit dem hochohmigen Eingang eines Breitbandverstärkers verbunden. Aufgrund der bei der Stoßwellenreflexion auftretenden Abstandsänderung entsteht ein schnelleproportionales Sondersignal, wobei die obere Grenzfrequenz durch die RC-Zeitkonstante der Sonde bestimmt ist. Die Eichung /23/ erfolgt durch entsprechende mechanische Schwingungsanregung der Sonde mit optisch bestimmter Amplitude und bekannter Frequenz.

"Punktförmige" Hydrophone

Piezoelektrische Drucksonden wurden lange Zeit durch Aufeinanderkleben von entgegengesetzt orientierten Piezokristallen in mm-Dimensionen hergestellt, wobei der Innenleiter des Meßkabels mit einer Metallfolie zwischen den Kristallen und der Außenleiter mit einer Metallbeschichtung auf der Außenseite des Kristallpakets verbunden wurde. Die Bandbreite dieser Hydrophone betrug in der Regel höchstens einige hundert KHz.

Die erste piezoelektrische Sonde mit einer Bandbreite von einigen MHz /24/ bestand aus einer auf einer Platinkugel von ca. 0,3 mm Durchmesser aufgesinterten Barium-Titanat-Schicht von etwa 0,1 mm Dicke. Die Platinkugel befand sich am Ende eines Platindrahtes als Innenelektrode, der in eine Glaskapillare eingeschmolzen war. Als Außenelektrode diente eine eingebrannte Silberschicht. Bei Anstiegszeiten von 50 ns betrug die Empfindlichkeit /11/ etwa 5 mV/bar. Diese Hydrophone werden jedoch in der voll ausgebildeten Stoßwelle /17/ schnell zerstört. Es ist zu vermuten, daß die gesinterte Barium-Titanat-Schicht den hohen mechanischen Spannungsgradienten in der Stoßfront nicht standhält (vergl. Wirkung auf Konkremente).

Ein ähnliches neues Hydrophon mit dem piezoelektrischen Polymer PVDF ist das Nadelhydrophon /20/. Der empfindliche Bereich dieses Hydrophons ist auf die mit PVDF bedeckte verrundete Spitze einer "Nadel" begrenzt, die in den Innenleiter einer dünnen koaxialen Zuleitung übergeht. Die Begrenzung des empfindlichen Bereichs auf die Spitze wird durch die nachträgliche Polarisation des PVDF-Materials z.B. in einer stark lokalisierten Koronaentladung erreicht. Als Außenleiter wird auch hier meistens Leitsilber verwendet. Anstiegszeiten von 50 ns bei einer Empfindlichkeit von 1 mV/bar können leicht erreicht werden. Diese Hydrophone sind aufgrund der elastischen Eigenschaften des PVDF-Materials gegenüber der Stoßwellenwirkung sehr beständig, allerdings wird der Leitsilberüberzug durch Kavitation zerstört, kann aber erneuert werden. Für einen glatten Frequenzgang, bzw. eine einwandfreie Impulsantwort, müssen bei der Herstellung dieser Hydrophone selbst kleinste Gasblasen im Polymermaterial und in der Leitsilberbeschichtung unbedingt vermieden werden.

Bei einem völlig anderen Meßprinzip, der optischen Sonde /19/, werden ein komplizierter mehrschichtiger Aufbau, zunehmende Schwierigkeiten bei der weiteren Miniaturisierung und Verlängerung der Zuleitungen, auf Kosten eines höheren geräteseitigen Aufwandes vermieden. Bei diesem Hydrophon wird die druckbedingte Dichte und damit Brechungsindexer-

höhung als Meßgröße bestimmt. Dies gelingt mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung durch die opto-elektronische Erfassung der Lichtreflexionsänderung am Ende einer in das Schallfeld eintauchenden Glasfaser. Hierzu wird Laserlicht in die Glasfaser eingekoppelt und das reflektierte Licht mit einem schnellen Fotodetektor in das elektrische Hydrophonsignal umgesetzt. Derzeit liegt die durch Laserrauschen bedingte Grenze der Druckauflösung bei etwa 1 bar mit einer Anstiegszeit von 50 nsec. Das Glasfaserhydrophon wird durch die Stoßwelle nicht zerstört, ebenso konnten bisher keine Kavitationsschäden beobachtet werden. Ein neues empfindliches Faserende kann jederzeit leicht durch Anritzen und Brechen hergestellt werden. Glasfaserlänge und Durchmesser sind ohne wesentliche Einwirkung auf die Empfindlichkeit.

Die Zeitauflösung ist bei seitlicher Schallinzidenz durch den Glasfaserdurchmesser begrenzt, der auf wenige μm reduziert werden kann, bei senkrechter Inzidenz durch die Lichtwellenlänge entsprechend einer Maximalfrequenz von 3 GHz. Bei genügend breitbandiger elektrooptischer Signalverarbeitung kann das gesamte Stoßwellendrucksignal incl. des Stoßfrontanstiegs wiedergegeben werden.

Kalibrierung

Stoßwellenhydrophone können ähnlich kalibriert werden wie andere Ultraschallwandler. Hierzu geeignet ist das über eine Strahlungsdruckwaage oder über die Oberflächenauslenkung /25/ geeichte Ultraschallfeld eines piezoelektrischen Strahlers.

Ebenso geeignet sind die bekannten Reziprozitätseichmethoden von Schallfeldern /26/, die auch bei der Eichung von PVDF-Nadelhydrophonen /20/ unter Verwendung von PVDF-Strahlern eingesetzt werden. Mit den genannten Ultraschallverfahren wird die Frequenzabhängigkeit der Empfindlichkeit bestimmt. Etwaige Phasenfehler, die die Pulsantwort beeinflussen, sind jedoch nur schwer quantitativ zu erfassen, wengleich sie sich durch Schwankungen des Amplitudenfrequenzgangs indirekt bemerkbar machen.

Ein für Stoßwellenanwendungen grundsätzlich geeigneteres Kalibrierverfahren ist daher die Bestimmung der Drucksprung- oder auch der Pulsantwort des Hydrophons. Dies ist besonders wichtig für die Kalibrierung im Bereich von einigen 100 bar entsprechend den Bedingungen bei medizinischen Stoßwellenanwendungen.

Solche Kalibrierungen sind in /6/ mit Hilfe von Stoßwellen in Flüssigkeitstößrohren bei Stoßwellenerzeugung durch Kolbenschlag und Gasmembranstößrohren bis zu Drucken von 600 bar durchgeführt worden. Bei der Gasstößrohrmethode kann der durch Einkopplung in das Wasserstößrohr entstehende Druck aus dem statischen Gasdruck berechnet werden; bei der Kolbenschlagmethode folgt der erzeugte Druck aus der Kolbengeschwindigkeit. Eine weitere Druckkontrolle ist wegen der großen Stoßwellendauer durch kommerzielle, geeichte Druckaufnehmer (Kistler-Sonden) möglich.

Eine Alternative zur Kalibrierung von Hydrophonen bis zu etwa 200 bar besteht in der Erzeugung von Druckimpulsen und Stoßwellen bekannter Amplitude mit dem elektromagnetischen Stoßwellengenerator /12/. Hier ergibt sich der Druck in der abgestrahlten ebenen Welle (bis auf eine korrigierbare Abweichung im Spulenzentrum) aus dem Generatorstrom und der Windungszahl pro Radius.

Im Bereich niedriger Drucke führt das Einschwingverhalten einer momentan aufgeladenen Piezoplatte zur Abstrahlung eines Rechteckwellenzuges /11/ leicht bestimmbarer Amplitude in eine angrenzende Flüssigkeit. Die gleichzeitig im Inneren der Platte mehrfach reflektierte mechanische Welle erzeugt über den reziproken Piezoeffekt einen dreieckförmigen Spannungsverlauf. Aus dessen Amplitude und weiteren einfach zu bestimmenden elektrischen und mechanischen Daten kann die Amplitude der abgestrahlten Rechteckwelle im Sinne einer Selbstreziprozitätseichung berechnet werden.

Eine einfache Kalibrierung bei hohen Stoßwellendruckten ist im Fokus eines Stoßwellengenerators mit Hilfe der bereits beschriebenen kapazitiven Schnelle-Sonde /23/ möglich. Nach der Bestimmung des absoluten Schallfelddruckes (Schnelle) mit der Sonde wird der Wasserspiegel über dem Generator erhöht und die zu eichende piezoelektrische Drucksonde an den gleichen Ort gebracht.

Schließlich ist auch das optische Sondenhydrophon leicht eichbar. Da der Zusammenhang zwischen Druck und Brechungsindex in Wasser bekannt ist, kann die stationäre Änderung der Lichtreflexion durch Vergleich des optischen Sonden Signals bei Wasser und z.B. einer Salzlösung mit leicht erhöhtem und ebenso bekanntem Brechungsindex bestimmt werden.

Insgesamt stehen somit eine Reihe von verschiedenen Kalibrierverfahren zum Vergleich zur Verfügung.

In diesem Bericht konnten nur die wichtigsten Stoßwellenerzeugungs- und Meßverfahren diskutiert werden. Nähere Einzelheiten sind der aufgeführten Literatur zu entnehmen.

Literatur:

- /1/ Urologische Steintherapie, ESWL und Endourologie
Herausg. von F. Eisenberger und K. Miller,
Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York 1987
- /2/ Stoßwellenlithotripsie bei Harn- und Gallensteinen
Herausg. von M. Ziegler, Springer Verlag 1987
- /3/ A Mechanism of Gallstone Destruction by Extracorporeal Shock Waves
M. Delius and W. Brendel, Naturwissenschaften
75, 200-201, (1988)
- /4/ Formung fokussierter akustischer Druckpulse
J. Staudenraus, K. Holdik, W. Eisenmenger
Fortschritte der Akustik, DAGA'87, DPG, pp.445
- /5/ Underwater Explosions
R.H. Cole, Dover Publications, New York 1965
- /6/ Propagation and Focussing of Spherical Shock Waves produced by Underwater Microexplosions
K. Takayama, H. Esashi, N. Sanada
Proc. 14th Int. Symp. on Shock Tubes and Waves (R.D. Archer and B.E. Milton Eds), Sydney 1983
- /7/ Der Schallimpuls eines Flüssigkeitsfunken
E. Baillitis, Z. f. angew. Physik 9, 429 (1957)
- /8/ Berührungsfreie Harnsteinzertrümmerung
F. Eisenberger, E. Schmiedt, Ch. Chaussy,
K. Wanner, B. Forßmann, W. Hepp,
K. Pielsticker, W. Brendel
Deutsches Arzteblatt, Arztliche Mitteilungen 17,
1145, (1977)
- Vergl. auch:
Eine Methode zur berührungsfreien Zertrümmerung von Nierensteinen durch Stoßwellen
B. Forßmann, W. Hepp, Ch. Chaussy,
F. Eisenberger, K. Wanner
Biomed. Techn. 22, 164 (1977)
- /9/ Stoßwellenfokussierung in Wasser
M. Müller, Dissertation RWTH Aachen, 1987
Vergl. ebenso
Experimental Investigation on Focussing of Weak Spherical Shock Waves in Water by Shallow Ellipsoidal Reflectors
M. Müller, Acustica 64, 85, (1987)
- /10/ Stoßwellen in Flüssigkeiten zur Untersuchung von Lösungsreaktionen, A. Jost
Dissertation, Göttingen (1966)
- /11/ Eine Kontrollschallquelle für breitbandige Mikrofone zur Messung von Druckimpulsen in Flüssigkeiten
Acustica 12, 165, (1962)
- /12/ Elektromagnetische Erzeugung von ebenen Druckstößen in Flüssigkeiten
W. Eisenmenger
Acustica, Akustische Beihefte, 12, 185, (1962)
- /13/ Experimentelle Bestimmung der Stoßfrontdicke aus dem akustischen Frequenzspektrum elektromagnetisch erzeugter Stoßwellen in Flüssigkeiten bei einem Stoßdruckbereich von 10 ATM bis 100 ATM
W. Eisenmenger
Acustica 14, 187, (1964)
- /14/ Nonlinear Acoustics
R.T. Beyer
Naval Sea Systems Command, 1974
- /15/ Einrichtung zur berührungsfreien Zertrümmerung von Konkrementen im Körper von Lebewesen
P 3312014C2 (1983)
- /16/ W. Eisenmenger, J. Staudenraus, unpublished, 1986
- /17/ W. Eisenmenger, unpublished, 1961
- /18/ Biological Effects of Shock-Waves: Kidney Damage by Shock Waves in Dogs, Dose Dependence
M. Delius, G. Enders, J. Xuan, H.G. Liebich, W. Brendel
Ultrasonics in Med.u.Biol. 14, 367, 1988
- /19/ Optisches Sondenhydrophon
J. Staudenraus, W. Eisenmenger
Fortschritte der Akustik, DAGA 1988, DPG GmbH
- /20/ Ultraschallwandler aus Polyvinylidenfluorid mit breitbandigem Übertragungsverhalten und fokussierenden Eigenschaften
M. Platte
Acustica 54, 23, 1983
- /21/ The Characteristics of a PVDF Membrane Hydrophone
D.R. Bacon
IEEE Trans. Sonics. Ultrason. Su-29, 18, (1982)
- /22/ Siehe /11/
- /23/ Elektrostatisches Sondenhydrophon mit einfacher Absoluteichung
W. Lawrenz, J. Staudenraus, W. Eisenmenger
Fortschritte der Akustik, DAGA 1988, DPG GmbH

- /24/ Miniature Piezoelectric Receivers
E.V. Romanenko,
Sov.Phys. Acoust. 3, 364, 1957
(Trans.. from J. Acoust. Soc. USSR)
- /25/ Ultraschall: Feldgrößen und ihre Bestimmung
R. Reibold
Fortschritte der Akustik, DAGA'87, DPG, S79
- /26/ Siehe /25/
- /27/ Comparative Measurement of the Physical Parameters of some Commercial Lithotriptors
J.E. Saunders
Vortrag: Conference for Ultrasonics in Biophysics and Bioengineering
Allerton Park, Monticello, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1988
- /28/ Physikalisch-medizinische Aspekte selbstfokussierter elektromagnetisch erzeugter Stoßwellen
W. Eisenmenger
Urologe, Verhandlungsberichte, 39, 69, 1988