AKUSTISCHE ORTUNG KOLLABIERENDER KAVITATIONSBLASEN IN WASSER UND IN GEWEBEPHANTOMEN

J. STAUDENRAUS, M. KÖHLER, U. LÜNSTROTH, W. EISENMENGER
1. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

1. Einführung

Für moderne Ultraschall- und Stoßwellenquellen, wie sie z.B. medizintechnisch in der Sonographie und in der Lithotripsie eingesetzt werden, beobachtet man in Wasser intensive Kavitation /1/. Unter Einwirkung des äußeren Drucks implodieren die als Folge hoher Unterdruckpulsanteile gebildeten Kavitationshohlräume, ein Vorgang der als Blasenkollaps bezeichnet wird. Mittels einer geeigneten Anordnung mehrerer Hydrophone gelingt es, Kavitationsblasen durch Rekonstruktion des Ausgangspunktes der beim Blasenkollaps abgestrahlten Stoßwellen zu orten.

2. Theorie

a.) linear akustisches Modell

Abgefedert durch adiabatische Kompression des Restgasvolumens erreicht die kollabierende Blase einen Minimalradius r_0 (Größenordnung nm..µm), wobei im Innern ein hoher Druck (kbar) entsteht. Von dieser kugelförmigen Oberfläche mit Radius r_0 wird zum Zeitpunkt t_0 eine Stoßwelle der Schnelleamplitude v_0 abgestrahlt, die sich als Kugelwelle mit Schallgeschwindigkeit c_0 ausbreitet. Bedingt u.a. durch die statistische Größenverteilung der Blasenkeime ist die Blasendynamik und damit sowohl t_0 als auch r_0 und v_0 nicht bekannt.

Geeignet im Raum angeordnet sei eine Anzahl n punktförmiger Hydrophone, jeweils im Abstand r_i (i=1..n) zum Mittelpunkt der Blase. Die Kavitationsstoßwelle erreicht die einzelnen Hydrophone zu den Zeitpunkten t_i (i=1..n).

Für nicht zu kleine Abstände r_i sind Druck und Schnelle einer Kugelwelle in guter Näherung durch den reellen Schallwellenwiderstand Z verknüpft. Hydrophon i registriert eine Druckamplitude p_i, die wegen $r_0 \ll r_i$ durch

$$p_i(r_i) = Zv_0/r_i \tag{1}$$

gegeben ist. Aus den Druckamplituden jeweils zweier Hydrophone i und j wird der unbekannte Parameter v_0 durch Quotientenbildung eliminiert:

$$p_i r_i = p_j r_j \tag{2}$$

Für die Laufzeitdifferenz zwischen je 2 Hydrophonen i und j gilt:

$$c_0(t_i-t_j) = r_i-r_j \tag{3}$$

Gleichung (2) bestimmt eine Kugelschale, Gl.(3) die zum Vorzeichen der Meßgröße (t_i-t_j) gehörige Schale eines zweischaligen Hyperboloids. Auf beiden befindet sich wegen $r_0 \ll r_i$ in guter Näherung der Blasenmittelpunkt. Durch n=4 Hydrophone beispielsweise sind drei Kugelschalen sowie die Schalen dreier Hyperboloide gegeben, deren Schnitt bei geeigneter Hydrophonanordnung jeweils den Ort des Kavitationsereignisses eindeutig festlegt.

Setzt man zur Erfassung der Kavitationsstoßwellensignale spezielle Sondenhydrophone mit großer empfindlicher Fläche und dadurch ausgeprägter Richtcharakteristik ein, so läßt sich aus der Signalanstiegszeit der Winkel zwischen Hydrophonachse und ankommender Stoßwelle berechnen. Die Hydrophonoberfläche bildet die Spitze eines Kegels, auf dessen Mantelfläche der Ort des Kavitationsereignisses liegt.

b.) nichtlineare Korrekturen

Die Amplitude einer divergierenden Kugelstoßwelle wird als Überlagerung des 1/r-Abfalls der Kugelwelle und der irreversiblen thermodynamischen Verluste in der Stoßfront beschrieben. Letztere sind durch den Zeitverlauf des abgestrahlten Druck- bzw. Stoßwellenpulses und somit durch die Dynamik des Blasenkollapses bestimmt. Im einfachsten Fall eines Dreieckpulses mit steiler Front, der im Verlauf der Ausbreitung seine Gestalt nicht ändert, gilt /2/

$$v_s(r) \sim \left(r \sqrt{\ln(r/r_0)} \right)^{-1} \tag{4}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_s(r)$ der Stoßwelle ist durch die Schnelleamplitude $v_s(r)$ der Stoßfront und den nichtlinearen Parameter B/A gegeben /2/:

$$c_s(r) = c_0+[1+B/(2A)]v_s(r)/2 \tag{5}$$

Für nicht zu große Laufwegunterschiede und in ausreichendem Abstand zum Ausgangspunkt der Kavitationsstoßwelle ist die mittels Gl.(4) und (5) berechnete Korrektur der Laufzeitdifferenz bzw. des Amplitudenquotienten vernachlässigbar. Bei Auswertung der Anstiegszeit ist zu beachten, daß die Pulsform in großem Abstand zum Ausgangspunkt der Kavitationsstoßwelle zunehmend verflacht.

3. Experiment

Bei Ausbreitung in teilentgastem Wasser wird bei hoher Amplitude im Schallfeld eines elektromagnetischen Kalottenstrahlers entlang der Senderachse ein zylindrisches Kavitationsblasenfeld beobachtet, das aus zahlreichen Einzelblasen mit Durchmessern bis 2 mm besteht /4/. In der Meßküvette (siehe Bild 1) sind 3 PVDF-Sondenhydrophone /4/ auf einem Kreisbogen mit Radius 95 mm angeordnet, dessen Mittelpunkt M in etwa 120 mm Abstand zur Schallquelle im Zentrum maxi-

maler Kavitationsentwicklung liegt.
Bild 2 zeigt die 750 µs nach Auslösung der Schallquelle aufgezeichneten Hydrophonsignale. Die beiden Kavitationsstoßwellen a und b unterscheiden sich durch ihre Amplitude und werden von den Hydrophonen H_1, H_2 und H_3 mit jeweils geringer Zeitdifferenz registriert. Auswertung der Laufzeitdifferenzen nach Gl.(3) liefert als Ausgangspunkt der Stoßwellen a und b in guter Näherung jeweils eine Gerade senkrecht zur Hydrophonebene durch einen Punkt etwa 15 mm links und 2.5 mm unterhalb bzw. 9 mm links und 0.5 mm oberhalb von M. Die Zuordnung von Ausgangspunkt und gemessenen Stoßwellensignalen wurde mit schlierenoptischen Methoden überprüft. Auf eine explizite Auswertung der Amplituden und Anstiegszeiten wurde angesichts der bei einem Abtastintervall von 100 ns hohen Meßunsicherheit verzichtet. c,d,e,f bezeichnen weitere Stoßwellensignale, für die keine Zuordnung im erfaßten Zeitfenster hergestellt werden konnte. Ihr Ausgangspunkt liegt in größerem Abstand zum Punkt M.
Bei unveränderter Geometrie wurde nun als Gewebephantom ein Gelatinezylinder (l=120 mm, ø 67 mm) in Längsrichtung auf der Senderachse positioniert. Die Konzentration der Gelatine wurde so gewählt, daß im Material keine Kavitation auftritt /4/. Im Zentrum des Gelatinekörpers befindet sich ein wassergefüllter, zylindrischer Hohlraum (l=38 mm, ø 12 mm), dessen Mittelpunkt mit M zusammenfällt. Bild 3 zeigt die durch H_1 bis H_3 zeitlich 900 µs gegen die Auslösung der Schallquelle verzögert aufgezeichneten Signale einer Kavitationsstoßwelle g, deren Ausgangspunkt 13 mm links und 4.5 mm unterhalb von M gelegen ist.

4. Ausblick

Als medizintechnische Anwendung der Kavitationsortung wird derzeit diskutiert, die im Schallfeld eines Lithotripters auftretende Kavitation zur Positionierung des Patienten auszunutzen /3/. Für alle von uns bisher unter in vitro Versuchsbedingungen charakterisierten Stoßwellenfelder allerdings ist der Ort maximalen Unterdrucks bzw. maximaler Kavitation ("Unterdruckfokus") gegenüber dem Ort maximalen Überdrucks bzw. maximaler Intensität ("Stoßwellenfokus") axial in Richtung Schallquelle verschoben /4,5,6/. Ferner hängt die Kavitationsschwelle einer Flüssigkeit u.a. von deren Viskosität sowie von der Größenverteilung vorhandener Kavitationskeime ab /7/. Für die Schallausbreitung im Patienten ist somit aufgrund der extrem inhomogenen Bedingungen (Muskelgewebe, Fettgewebe, Körperflüssigkeiten, Stein, evtl. medizinisch indizierte Spüllösungen) zu erwarten, daß "Unterdruckfokus" und beobachtetes Zentrum der Kavitation nicht übereinstimmen.
Unsere Untersuchungen haben primär das Ziel, eine empfindliche Methode zum

Nachweis und zur Lokalisation einzelner Kavitationsereignisse in beschalltem Gewebe zu entwickeln. Aufbauend auf unseren bisherigen Ergebnissen soll in zukünftigen Experimenten untersucht werden, inwieweit Konkrementzertrümmerung und Wirkungen auf das Gewebe mit dem Auftreten von Kavitation korreliert sind.

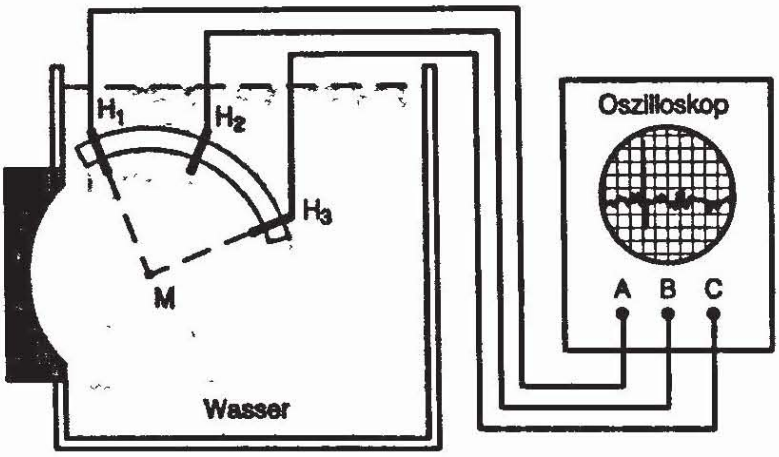

Bild 1: Versuchsanordnung zur Kavitationsortung:
H_1, H_2, H_3: Hydrophone
M: Kavitationszentrum
S: elektromagnetische Impulsschallquelle

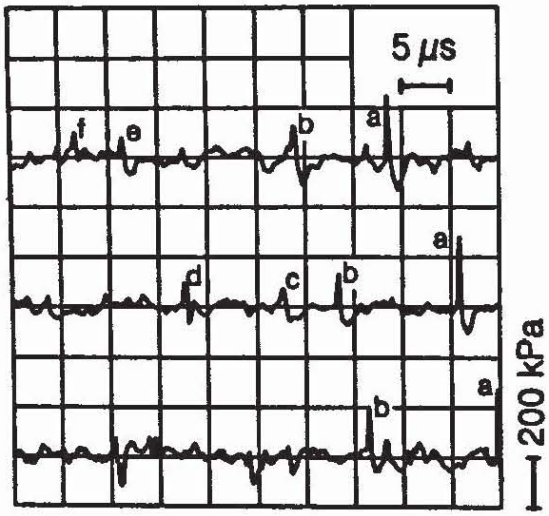

Bild 2: Kavitationsstoßwellensignale der Hydrophone H_1 (oben), H_2 (Mitte) und H_3 (unten) in teilentgastem Wasser

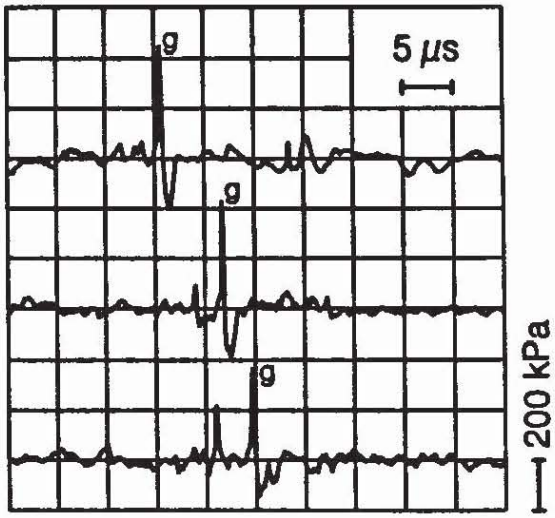

Bild 3: Kavitationsstoßwellensignale aus einem in Gelatine eingebetteten, wassergefüllten Hohlraum

Schrifttum

/1/ Coleman, A.J. et al., Ultrasound Med. & Biol. 13 (1987), 69-76

/2/ Rozenberg, L.D.: High-intensity ultrasonic fields (Plenum Press 1971)

/3/ Rech, V., Dissertation (Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1992)

/4/ Staudenraus, J., Fortschrittberichte VDI Reihe 21, Nr.89 (VDI-Verlag 1991)

/5/ Staudenraus, J., Eisenmenger, W., Fortschritte der Akustik-DAGA'91,217-220

/6/ Staudenraus, J., Eisenmenger, W., Ultrasonics 31 (1993), in press

/7/ Young, F.R.: Cavitation (McGraw-Hill 1989)