

Stoßwellenfokussierung in Wasser

by Michael Müller

Dissertation, Aachen (1987)

English translation

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie verdeutlicht an mehreren Beispielen die Möglichkeiten zur Fokussierung von Stoßwellen in Wasser durch Reflexion an unterschiedlichen Reflektoren. Dabei wurden die theoretischen Überlegungen bezüglich des Ausbreitungs- und Reflexionsverhaltens von Wasserstoßwellen bestätigt, wonach sich Stöße in Wasser bis zu relativ hohen Drücken von einigen hundert bar in sehr guter Näherung durch die Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Akustik beschreiben lassen. Erst für Druckwerte oberhalb von etwa 300 bar treten erste nichtlineare Effekte in Erscheinung. Veränderungen im Reflexionsverhalten können dann allerdings durch angepaßte Reflektorkonturen wiederum kompensiert werden. Am Beispiel eines Parabelreflektors wurde gezeigt, daß sich für jede Stoßstärke jeweils eine modifizierte Reflektorform berechnen läßt, die alle Flächennormalen auf einen Punkt reflektiert, solange eine Machreflexion vermieden wird. Im anschließenden Konvergenzprozeß wirken jedoch weitere nichtlineare Effekte einer hohen Energiekonzentration entgegen. Inwieweit diese die nach der geometrischen Akustik im Fokus berechneten Singularitäten begrenzen, wurde durch Experimente an 14 verschiedenen Reflektoren verdeutlicht.

Die Fokussierung ebener Stoßwellen wurde an zwei Parabelreflektoren innerhalb eines senkrechten Wasserstoßrohres untersucht. Die Druckamplitude der einfallenden Welle konnte zwischen 4-400 bar variiert werden. Die geringen Stoßstärken ergaben sich durch Einkoppeln von Luftstoßwellen, die stärkeren bei Belastung der Wassersäule durch einen aufprallenden Kolben. Schlierenaufnahmen zeigten keine erkennbaren Abweichungen zur akustischen Ausbreitung. Druckmessungen ergaben allerdings einen abnehmenden Fokussierungsgrad mit steigender Brennweite und wachsender Stoßstärke, was einen größeren Einfluß geringer Nichtlinearitäten widerspiegelt. Auch Wandeffekte beeinflussten den Fokussierungsprozeß. Daher entwickelte sich nur eine bescheidene Verstärkung von maximal dem Dreifachen der einfallenden Stoßstärke.

Wesentlich effektiver zeigte sich dagegen die Fokussierung sphärischer Stoßwellen durch Ellipsoidreflektoren. Durch ihren Einbau innerhalb eines größeren Wasserbeckens wurden Wandeffekte ausgeschlossen. Die Stoßerzeugung erfolgte durch eine kurzzeitige Funkenentladung und für höhere Ausgangsenergien durch

durch eine kurzzeitige Funkenentladung und für höhere Ausgangsenergien durch Sprengkapseln. Beobachtungen des zeitlichen Verlaufs der Stoßfokussierung ermöglichte eine Schattenoptik, während zur Messung der räumlichen Druckverteilung eigens eine Miniaturdrucksonde auf der Basis des piezoelektrisch polarisierbaren Kunststoffes PVDF entwickelt werden mußte. Mit ihrer Anstiegszeit von etwa 50 ns und einer Ausdehnung des empfindlichen Druckmessers von etwa 0,4 mm sind zeit- und ortsauflösende Messungen hoher Genauigkeit bis in den Fokusbereich möglich.

Anhand von fünf flachen Ellipsoidsegmenten, bei denen die Stoßerzeugung reflektorfern stattfindet und an sieben tiefen Reflektoren, die das Stoßzentrum umschließen, wurde der Einfluß verschiedener Reflektorparameter wie Durchmesser, Tiefe, Brennweite und Material auf den Fokussierungsprozeß verdeutlicht.

Im Falle der flachen Reflektoren ist durch ihre geringe Wölbung die Druckverteilung auf der reflektierten Front nahezu konstant. Sie wurden daher für grundlegende Untersuchungen bevorzugt. Es zeigte sich, daß eine Vergrößerung der Reflektorfläche bei ansonsten gleichen Reflektordaten eine Steigerung des Fokussierungsgrades bewirkt, die in etwa proportional zur Wurzel des Flächenverhältnisses ist. Eine weitere Verbesserung des Fokussierungseffektes konnte darüber hinaus durch eine Vergrößerung des Konvergenzwinkels erzielt werden. Der Reflektor mit dem größten Durchmesser-zu-Brennweite-Verhältnis von $D/f = 3$ erzielte daher auch die größte Verstärkung von über 100 gegenüber dem einfallenden Stoß am Ort des Reflektors. Dies entspricht einem Druck im Fokus von etwa 1200 bar. Die zeitliche Pulslänge der Fokusamplitude beträgt dabei nur wenige hundert Nanosekunden. Ihre Anstiegszeit ist kleiner als 50 ns.

Während der gesamten Fokussierung waren Abweichungen vom akustischen Frontverlauf nicht zu erkennen. Daher stimmt die Lage des Druckmaximums bei allen fünf flachen Ellipsoidsegmenten mit dem geometrischen Fokus überein. Die Ausdehnung des Fokus ist scharf begrenzt. Seine laterale Halbwertsbreite zeigte sich in allen Beispielen - bezogen auf die Brennweite - nahezu konstant und beträgt etwa 2 Prozent der Brennweite.

Einer der flachen Reflektoren war aus einem schallweichen Material hergestellt. An seiner Oberfläche wurden einfallende Stoßwellen unter Phasenumkehr zu Expansionswellen reflektiert. Sie konnten bis zu Zugspannungen von -90 bar fokussiert werden. Eine weitere Steigerung wurde durch die Bildung zahlreicher Kavitationsblasen behindert.

Gegenüber den flachen Reflektoren traten bei den tiefen Ellipsoiden durch die langen Wege bis zum Fokus nichtlineare Effekte deutlich hervor. Sie wurden gefördert durch die geometrisch bedingte Druckkonzentration auf den achsnahen Bereich sowie durch das von Beginn an hohe Druckniveau der Fokussierung. Dies führte zu einer Verringerung der Stoßkrümmung im Zentralbereich und damit für diesen Teil der Stoßfront zu einer frühzeitigen Beendigung der Fokussierung

für diesen Teil der Stoßfront zu einer frühzeitigen Beendigung der Fokussierung schon vor dem geometrischen Fokus. Mit zunehmender Reflektorgröße gewinnen aber die Außenbereiche für die Fokussierung immer mehr an Bedeutung, so daß sich im Zusammenspiel der verschiedenen Frontabschnitte die maximale Druckamplitude sogar bis hinter den geometrischen Fokus verschieben kann. Insgesamt ergaben sich für die tiefen Reflektoren ausgedehntere Fokusbereiche. Daher wurden, bei gleichen Stoßerzeugungsenergien wie bei flachen Ellipsoiden, nur Maximaldrücke von etwa 400 bar erzielt, obwohl die Flächenausnutzung mit ca. 90 Prozent gegenüber 5 Prozent bei den flachen Ellipsoiden wesentlich erhöht ist. Auch eine Steigerung der Erzeugungsenergien konnte kaum eine Erhöhung des Fokaldruckes bewirken. Vielmehr ergab die Zunahme nichtlinearer Ausbreitungsprozesse eine Ausweitung des Fokalbereichs.

Ein entwickeltes Rechenprogramm, basierend auf einem Diskretisierungsverfahren von Davies und Guy, beschreibt den Front- und Druckverlauf während der Fokussierung in guter Übereinstimmung mit den Experimenten. Auch bezüglich der Lage des Druckmaximums und der Frontamplituden wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt. Das Nachfeld der Stoßfront wird mit diesem Verfahren allerdings nicht berücksichtigt. Dennoch eignet es sich gut für Parameterstudien in der Entwurfsphase eines Reflektors.

Abschließend wurden am Beispiel einiger Einzelversuche die Wirkungen fokussierter Wasserstoßwellen auf verschiedene Materialien vorgestellt. Spröde Werkstoffe ließen sich schon durch wenige Beschallungen zerstören. Zäh Materialien konnten dagegen kaum beeinflußt werden. Bei einer Belastung von Zellgeweben mit einer ähnlichen akustischen Impedanz wie Wasser ergab sich allerdings eine Wachstumsverzögerung, so daß eine gezielte Anwendung in der medizinischen Therapie möglich erscheint.

Die Verwendung von flachen Reflektoren mit großen Konvergenzwinkeln könnte gegenüber den bisher eingesetzten tiefen Ellipsoiden, z.B. in der Medizin, eine schonendere Behandlung gewährleisten. Durch ihren Vorteil einer exakteren Fokussierung und durch die Begrenzung des Druckbereiches ausschließlich auf einen eng begrenzten Fokalraum, würden unerwünschte Belastungen des umgebenden Gewebes weitgehend vermieden. Zugleich lassen sich leichter höhere Amplituden erreichen, die eine Verkürzung der Behandlungszeit ermöglichen. Denkbar wäre z.B. ein kalottenförmiger Sender, der - je nach Anwendungsfall - in unterschiedlicher Größe direkt am Ort seiner Oberfläche eine sphärische Stoß- oder Expansionswelle erzeugt. Dies könnte realisiert werden durch piezoelektrische Elemente auf einer sphärischen Oberfläche, wobei durch die gleichzeitige, schnelle Anregung eine orthogonale Bewegung der Oberfläche erzielt werden könnte, die eine schwache Stoß- oder Expansionswelle oder abwechselnd beides bewirkt. Gleichzeitig wäre dieses Gerät auch als Empfänger einsetzbar. Durch das starke Eindringvermögen der erzeugten Stoßwelle wäre so auch eine Ortung tief liegender Ziele möglich, was sich gegenüber der Ultraschalldiagnostik als sehr vorteilhaft erweisen würde. Eine Einkopplung des Pulses in das

Körpergewebe muß zudem nicht unbedingt über Wasserstoßwellen erfolgen. Ein dünnwandiges Übertragungskissen mit einer entsprechend angepaßten akustischen Impedanz könnte in einfacherer Weise den Energietransport übernehmen, was insgesamt zu beträchtlichen Einsparungen hinsichtlich Ortungseinrichtungen und Wasseraufbereitungsanlagen führen würde. Ein in dieser Weise modifiziertes Therapiegerät würde neben seiner vereinfachten Handhabung bei der Steinbehandlung auch eine Applikation in der Beeinflussung erkrankter Gewebepartien wesentlich erleichtern. Somit scheint eine Behandlung z.B. karzinomer Bereiche an bisher unzugänglichen Stellen durch fokussierte Druck- oder Zugwellen, bzw. gezielt erzeugte Kavitationen, keine Utopie.



[Home page of the Institute for high temperature gas dynamics](#)