

Modellierung fokussierender piezoelektrischer Schallsender für therapeutische Anwendungen

Thomas Dreyer und Rainer E. Riedlinger

Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe; Email: Thomas.Dreyer@ihe.uka.de

Einleitung

Fokussierende piezoelektrische Schallsender werden in therapeutischen Anwendungen wie der extrakorporalen Stoßwellenlithotripsie und der extrakorporalen Stoßwellentherapie (ESWT) eingesetzt. Diese Sender strahlen Ultraschallimpulse hoher Amplitude in ein fluides Medium ab. In der Fokusregion werden dabei aufgrund nichtlinearer Ausbreitungseffekte Spitzenamplituden von über 100 MPa erzeugt. Die Entwicklung dieser Sender erfolgt bislang meist durch einfache Modellannahmen, sowie aufgrund empirischer Ergebnisse. Moderne numerische Simulationsverfahren bieten die Möglichkeit einer verbesserten Modellbildung, wobei sich zur Simulation piezoelektrischer Sender die Finite Elemente Methode (FEM) im Zeitbereich [1] bewährt hat. Allerdings lassen sich derzeit aufgrund begrenzter Rechnerressourcen nur Teile von Sendern großer Apertur mit numerischen Methoden simulieren. Neben der Simulation des Schwingungsverhaltens und der Abstrahlung wäre es wünschenswert die Schallausbreitung samt Fokussierung zu integrieren, um eine Aussage über den zu erwartenden Druckimpuls in der Fokusregion treffen zu können. Das Senderdesign würde weiterhin vereinfacht werden, wenn, ausgehend von einem gewünschten Druckimpuls im Fokus, die benötigte elektrische Eingangsspannung für einen gegebenen Sender berechnet werden könnte. Die erste Aufgabe kann durch geeignete Ausbreitungsmodelle gelöst werden, die nichtlineare Effekte berücksichtigen [2]. Letzteres kann hingegen unter der Annahme linearer Verhältnisse approximiert werden.

Modellbeschreibung

Der prinzipielle Aufbau ist aus Abbildung 1 zu ersehen, die einen Ausschnitt eines Senders für die Lithotripsie zeigt. Das Design basiert auf der Anordnung von bis zu mehreren tausend einzelnen zylindrischen Piezokeramiken auf einer Aluminiumkalotte, die als Träger und als teilabsorbierendes Backing dient. Zur Erhöhung der Druckamplitude an der Senderoberfläche werden in neueren Designs die Piezokeramiken auf beiden Seiten einer Aluminiumkalotte aufgebracht [3].

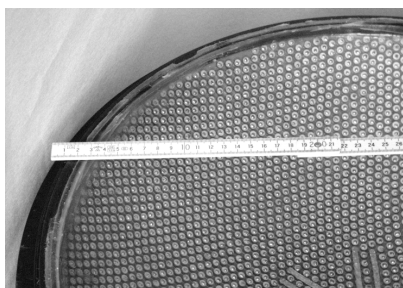


Abbildung 1 Teil eines Senders für die ESWL

Eine schematische Übersicht über die gesamte Anordnung ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Sender wird von einem Hochspannungsimpulsgenerator angesteuert, der auf einer getriggerten Kondensatorentladung basiert. Die Abstrahlung erfolgt in Wasser.

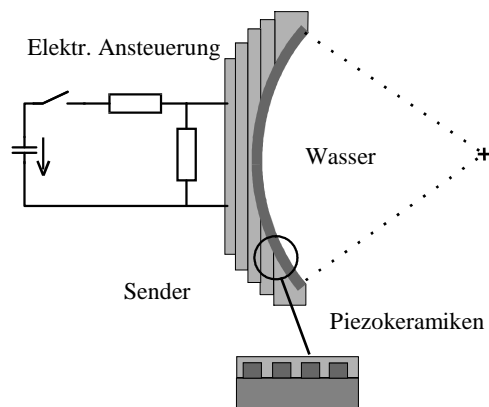


Abbildung 2 Schema der Senderanordnung

Dieser in Abbildung 2 dargestellte prinzipielle Aufbau kann als Kopplung von drei Einzelkomponenten betrachtet werden:

- Elektrische Beschaltung
- Elektro-mechanisches System (Sender)
- Akustische Ausbreitung und Fokussierung

Die elektrische Beschaltung kann durch Standardmethoden der Netzwerkanalyse simuliert werden, wobei hier die elektrische Eingangsimpedanz des Wandlers bekannt sein muss. Als Simulationsstool für den Wandler wird die FEM im Zeitbereich mit dem Programmpaket CAPA verwendet. Damit besteht auch die Möglichkeit, die benötigten elektrischen Kenngrößen des Senders zu berechnen. Die Schallausbreitung ist generell nichtlinear und kann mit einem entsprechenden Ausbreitungsmodell berechnet werden [2]. Eine lineare Näherung der Ausbreitung bietet jedoch den Vorteil, dass alle drei Komponenten lineare Systeme darstellen, siehe Abbildung 3.

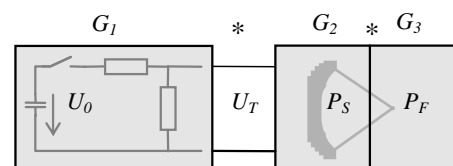


Abbildung 3 Lineares Systemmodell

Dadurch kann der resultierende Druckpuls, bei Kenntnis der jeweiligen Übertragungsfunktionen, durch eine schnell durchzuführende Faltungsoperation ermittelt werden. Diese Operation ist prinzipiell umkehrbar, so dass für eine gewünschte Druckpulsform die benötigte Eingangsspannung berechnet werden kann.

FEM-Modell

Da es praktisch unmöglich ist, den kompletten Sender numerisch zu simulieren, sind einige Vereinfachungen notwendig. Die symmetrische Platzierung der Piezokeramiken (Abbildung 1) erlaubt die Verwendung symmetrischer Randbedingungen, so dass nur ein kleiner Teil des Senders modelliert werden muss. Des Weiteren wird ein ebener und unendlich ausgedehnter Sender angenommen, was auf das in Abbildung 4 gezeigte FEM-Modell führt [1]. Das Modell berücksichtigt auch die Abstrahlung in ein Wassergebiet.

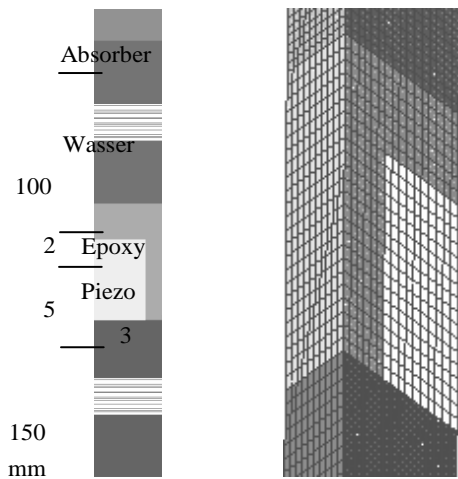


Abbildung 4 Simulierter Teil des Senders mit FEM Modell

Simulations- und Messergebnisse dieses Modells zeigten dabei eine gute Übereinstimmung [1]. Der abgestrahlte Druckimpuls erzeugt nahe der Senderoberfläche eine örtlich inhomogene Verteilung, erst in einer genügend großen Entfernung (>80 mm) bildet sich eine ebene Wellenfront aus. Dieses erleichtert die Aufgabe dahingehend, dass ein örtlich unabhängiges Drucksignal als Ausgangsgröße für die Berechnung einer Impulsantwort bzw. einer Übertragungsfunktion verwendet werden kann. Mit einer determinierten elektrischen Anregung, die alle relevanten Frequenzen enthält, kann die gewünschte Übertragungsfunktion sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich berechnet werden [4]. Die lineare Fokussierung wurde durch eine Rayleigh-Integral Approximation berücksichtigt. Dabei entspricht der zeitliche Verlauf des Signals im Fokus der zeitlichen Ableitung des Signals an der Senderoberfläche.

Simulationsergebnisse

Die Verifizierung des Simulationsmodells erfolgte an einem ESWL-Sender nach Abbildung 1 mit einem Durchmesser von 500 mm und einer geometrischen Brennweite von 354 mm. Die Messungen wurden bei einer Ansteuerspannung von ca. 600 V_s mit einem faseroptischen Hydrofon im geometrischen Fokus durchgeführt. Dabei wurde sichergestellt, dass lineare Ausbreitungsverhältnisse vorliegen. Der Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem (gestrichelt) Schalldruckverlauf ist in Abbildung 5 dargestellt.

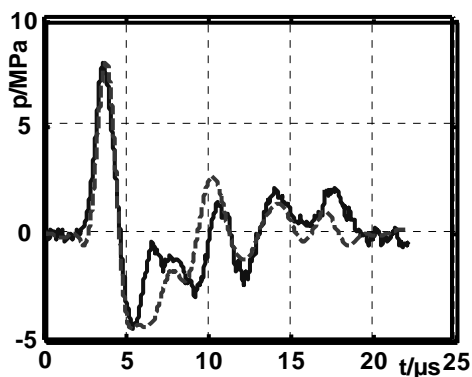


Abbildung 5 Drucksignal im Fokus

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Messung und dem durch Faltung berechneten Signal, insbesondere in der Übereinstimmung der maximalen und minimalen Amplituden.

Ausgehend von diesen Resultaten wird nachfolgend untersucht, inwieweit sich eine vorgegebene Änderung der Pulsform im Fokus

auf die Eingangsspannung auswirkt. Insbesondere eine Verringerung des Zuganteils gilt als wünschenswert, da hierdurch die Wahrscheinlichkeit gewebsschädigender Kavitation verringert wird.

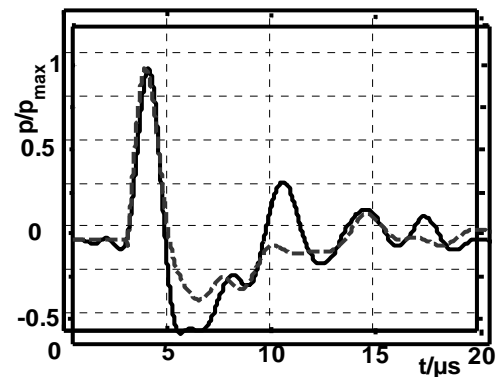


Abbildung 6 Simulierte Drucksignale im Fokus

Abbildung 6 zeigt ein Drucksignal (gestr.) dessen Minimalamplitude bei unverändertem Senderdesign um ca. 20% reduziert ist. Das daraus durch Entfaltung gewonnene Ansteuersignal ist in Abbildung 7 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass eine Änderung der Spannung innerhalb der ersten 7 μs zu dem modifizierten Drucksignal führt. Eine experimentelle Überprüfung dieser Ergebnisse steht noch aus ist aber prinzipiell möglich.

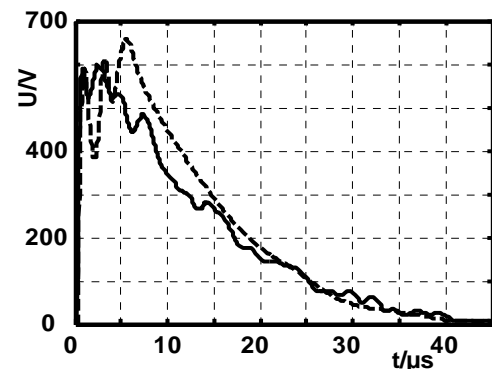


Abbildung 7 Simulierte Ansteuerspannungen

Schlussfolgerungen

Die dargestellte Modellierungsstrategie bietet die Möglichkeit, das Design piezoelektrischer Sender für therapeutische Anwendungen zu vereinfachen. Zeitaufwändige FEM Berechnungen sind nur für die Identifikation einer Übertragungsfunktion notwendig. Durch die Verwendung von Faltungsoperationen wird die Berechnung der Drucksignale und der Eingangsspannungen deutlich beschleunigt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse können als Eingangsdaten für nichtlineare Ausbreitungsrechnungen dienen.

- ¹ Dreyer, T., Riedlinger, R. Modeling of Piezoceramic Composite Transducer Structures Generating Strong Sound Pulses in Therapy -Proc. 2001 IEEE Ultrasonics Symposium
- ² Ginter, S., Liebler, M., Steiger, E. et al. Full Wave Modeling of Therapeutic Ultrasound: Nonlinear Propagation in Ideal Fluids - J. Acoust. Soc. Am. (111) p.1239, 2002
- ³ Dreyer, T., Krauss, W., Bauer, E. et al. Investigations of Compact Self Focusing Transducers using Stacked Piezoelectric Elements for strong Sound Pulses in Therapy -Proc. 2000 IEEE Ultrasonics Symposium
- ⁴ Dreyer, T., Riedlinger, R. Combination of Finite Element Simulations and Linear Systems Theory for Pulse Shaping of Piezoelectric Transducers Used in Therapy -Proc. 2002 IEEE Ultrasonics Symposium