

Methoden zur Rekonstruktion von Ultraschallfeldern aus räumlich gemittelten Messwerten

T. Boutkedjirt, R. Reibold

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Einleitung:

In der Ultraschall-Messtechnik – speziell auf dem Gebiet der medizinischen Diagnostik – werden heutzutage Frequenzen bis etwa 50 MHz verwendet. Diese hohen Frequenzen machen die Entwicklung von Sensoren mit der erforderlichen hohen Zeit- und Ortsauflösung erforderlich, damit eine zuverlässige Messung der Ultraschallfelder möglich ist. In diesem Zusammenhang sind neuere faseroptische und interferometrische Messverfahren [1] zu erwähnen, die allerdings derzeit auf wenige, technisch gut ausgestattete Laboratorien beschränkt sind. Herkömmliche piezoelektrische Hydrophone genügen hingegen in dem erwähnten Frequenzbereich bei weitem nicht den Anforderungen an einen "Punktempfänger". Es ist daher naheliegend, Methoden zu entwickeln, mit denen räumlich gemittelte Messwerte von Hydrophonen entfaltet werden können.

Ausgehend von einem raum- und zeitinvarianten, linearen Modell für das Messsystem wird gezeigt, dass mit Hilfe sogenannter Rekonstruktionsfilter der Mittelungseffekt von Hydrophonen numerisch invertiert werden kann. An Hand von Simulationen eines mit einem Hydrophon endlicher Fläche „gemessenen“ Schallfeldes werden drei Methoden für die Rekonstruktion des Schallfeldes getestet. Die Ergebnisse der Simulation werden experimentell überprüft und mit geeigneten Referenzmessungen verglichen.

1. Lineares Modell für die Erfassung des Schallfeldes und seine Rekonstruktion:

Es wird ein harmonisches Schallfeld mit dem komplexen Druck $P(x, y)$ in der Querschnittsebene $z=z_0$ (Schallquelle liegt bei $z=0$) zugrunde gelegt. Für das Hydrophon als raum- und zeitinvariantes, lineares Empfangssystem kann die gelieferte elektrische Spannung $V(x, y)$ mit wie folgt beschrieben werden [2]:

$$V(x, y) = H_\omega(x, y) *_{x,y} P(x, y) + N(x, y). \quad (1)$$

$H_\omega(x, y)$ bezeichnet die räumliche Impulsantwort des Hydrophons (Apertur), $*_{x,y}$ den zweidimensionalen räumlichen Faltungsoperator und $N(x, y)$ ein signal-unabhängig angenommener Rauschanteil.

Ausgehend von den gemittelten und verrauschten Messwerten ist das Ziel, einen Schätzwert $\hat{P}(x, y)$ von $P(x, y)$ durch Anwendung geeigneter Rekonstruktionsmethoden zu gewinnen.

2. Simulation des Mittelungseffektes des Hydrophons:

Für die numerische Simulation wird das Schallfeld eines kreisförmigen Kolbenstrahlers (Radius $a=5\lambda$) zugrunde gelegt. Abb.1 (Kurve a) zeigt den bekannten, axialen Verlauf der normierten Druckamplitude p/p_0 . Durch den Mittelungseffekt des Hydrophons (idealisierte, rechteckige Apertur $2,1\lambda \times 1,1\lambda$ mit

konstanter, ortunabhängiger Empfindlichkeit) wird die

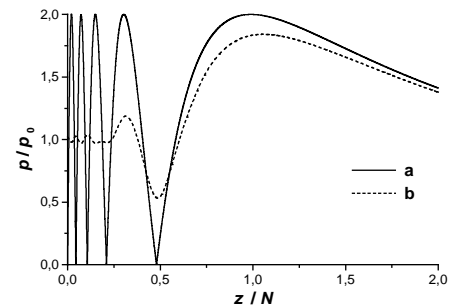


Abb.1: Axialer Druckverlauf eines runden Kolbenstrahlers mit dem Radius $a=5\lambda$ (Kurve a) und gemittelter Druckverlauf eines rechteckigen Hydrophons ($2,1\lambda \times 1,1\lambda$) (Kurve b). (z : Abstand von der Senderoberfläche, λ : Schallwellenlänge, $N=a^2/\lambda$: Nahfeldlänge).

Nahfeldstruktur des Kolbenstrahlers mit abnehmendem Abstand von der Schallquelle mehr und mehr geglättet (Kurve b).

3. Prinzip der Rekonstruktionsmethoden:

Die intuitive Rekonstruktionstechnik ist die inverse Filterung. Diese Technik führt jedoch zu einer Verstärkung des Rauschens und versagt, wenn die Übertragungsfunktion des Systems Nullstellen aufweist [3]. Die schlechte Konditionierung dieses Problems kann durch Anwendung zusätzlicher einschränkender Bedingungen beseitigt werden.

a) Das Wiener-Filter liefert die beste Approximation des zu rekonstruierenden Feldes im Sinne der minimalen mittleren Fehlerquadrate, d.h. $E\{\|\hat{P}(x, y) - P(x, y)\|^2\} \rightarrow \min$, wobei E den Erwartungswert bezeichnet [4].

b) Das Leistungsspektrum - Ausgleichsfilter (LSA) beruht auf dem Ausgleich zwischen den räumlichen spektralen Leistungsdichten des zu rekonstruierenden Feldes Φ_{pp} und seinem Schätzwert $\Phi_{\hat{p}\hat{p}}$, d.h.: $\Phi_{\hat{p}\hat{p}}(k_x, k_y) = \Phi_{pp}(k_x, k_y)$, wobei (k_x, k_y) die Komponenten des Wellenvektors sind [5].

c) Bei der Maximum-A-Posteriori-Methode (MAP) wird die maximale *a-posteriori* Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das rekonstruierte Feld gesucht, d.h.: $p(P(x, y) | V(x, y)) \rightarrow \max$ (linearer Sonderfall) [4,5].

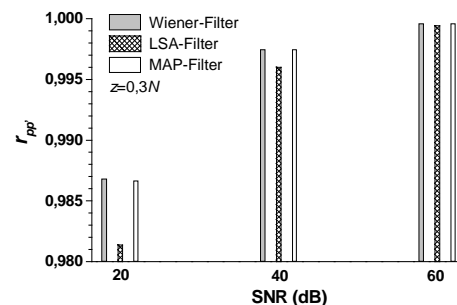


Abb.2: Normierter Korrelationskoeffizient $r_{\hat{p}\hat{p}}$ für verschiedene SNR und Rekonstruktionsmethoden

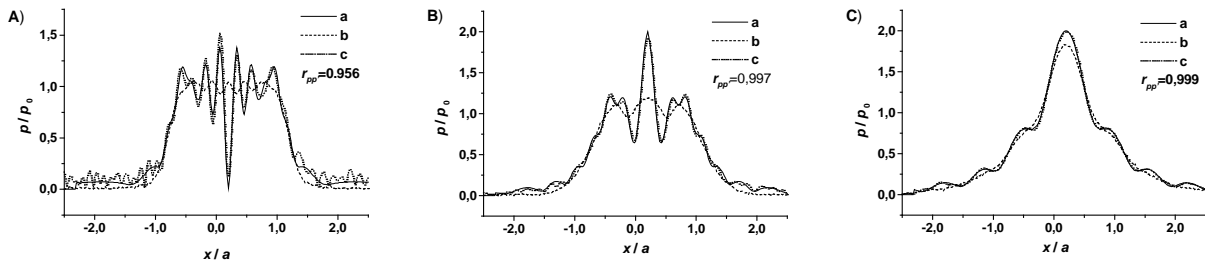


Abb.3: Verlauf der normierten Druckamplitude (x -Richtung, Längsrichtung des Hydrophons) des Schallfeldes eines kreisförmigen Kolbenstrahlers (Radius $a=5\lambda$) in den Querschnittsebenen A) $z=0,1N$; B) $z=0,3N$; C) $z=N$. a) simuliert, b) gemittelt (Hydrophonapertur: $2,1\lambda \times 1,1\lambda$, $\text{SNR}=40\text{dB}$, Sampleintervall: $\Delta x=\Delta y=0,1\lambda$) und c) rekonstruiert mit einem Wiener-Filter.

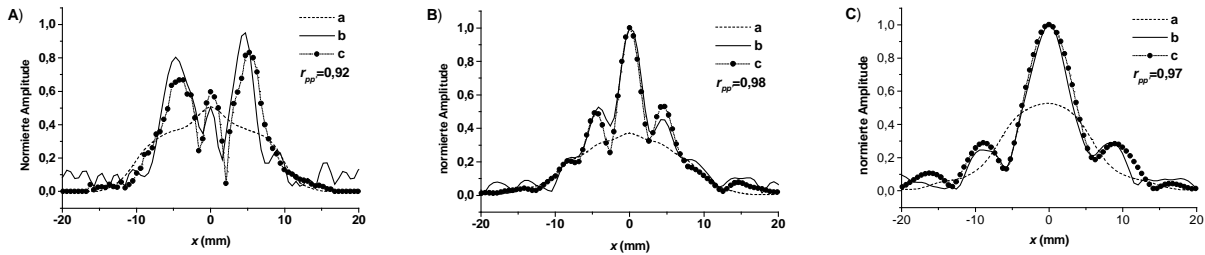


Abb.4: Verlauf der normierten Druckamplitude (x -Richtung, Längsrichtung des Hydrophons) des Schallfeldes eines runden Wandlers ($\varnothing=20\text{mm}$, $f=2,25\text{MHz}$) in der Querschnittsebenen A) $z=22,5$; B) $z=68,3$; C) $z=137,6\text{mm}$. A) gemessen mit einem PVDF-Membran-Hydrophon rechteckiger Apertur ($11 \times 5,76\text{mm}^2$), b) rekonstruiert mit einem Wiener-Filter und c) gemessen mit einem Nadelhydrophon ($\varnothing=0,5\text{mm}$). Abtastschrittweite: $\Delta x=\Delta y=0,524\text{mm}$.

4. Simulationsergebnisse:

Um die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Methoden zu überprüfen, wurden drei Querschnittsebenen ($z=0,1N$; $z=0,3N$; und $z=N$) mit abnehmender Raumfrequenz-Bandbreite ausgewählt. Den simulierten „Messwerten“ wurde ein weißes, gaußsches Rauschen mit einem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von 20dB, 40dB und 60dB hinzugefügt. Als Kriterium für die Güte der Rekonstruktion dient der normierte Korrelationskoeffizient r_{pp} zwischen dem geschätzten und dem zu rekonstruierenden Schalldruck.

Die Korrelationskoeffizienten der Simulation für die Ebene $z=0,3N$ sind in Abb.2 dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt für alle Filter die Rekonstruktionstreue mit abnehmendem SNR ab. Wegen der fehlenden Phaseninformation ist dieser Effekt beim LSA besonders ausgeprägt. Diese Tendenzen sind unabhängig vom Abstand zwischen „Messebene“ und Sendewandler. Wegen der abnehmenden Bandbreite nimmt außerdem der Korrelationskoeffizient mit dem Abstand von der Schallquelle zu. Abb. 3 (Kurve c) gibt als Beispiel das rekonstruierte Druckprofil in der x -Richtung bei einem $\text{SNR}=40\text{dB}$ für die drei Ebenen wieder. Zum Vergleich sind die entsprechenden Profile des simulierten und des gemittelten Feldes gezeigt (Kurve a bzw. b).

5. Experimentelle Untersuchung:

Die Rekonstruktionsmethoden wurden im Schallfeld eines runden Wandlers ($\varnothing=20\text{mm}$) bei einer Frequenz von 2,25MHz in den Querschnittsebenen $z=22,5\text{mm}$, $z=68,3\text{mm}$ und $z=137,6\text{mm}$ mit einem großflächigen PVDF-Membran-Hydrophon (Eigenbau) rechteckiger Apertur ($11\text{mm} \times 5,75\text{mm}$ bzw. $16,7\lambda \times 8,7\lambda$) experimentell überprüft. Die Referenzmessung wurde mit einem Nadelhydrophon ($\varnothing=0,5\text{mm}$) durchgeführt. Die Abtastschrittweite betrug in allen Fällen $\Delta x=\Delta y=0,524\text{mm}$. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 zusammengestellt.

Für die Wiener- und MAP-Methode wurden normierte Korrelationskoeffizienten $r_{pp}=0,92$ für $z=22,5\text{mm}$,

$r_{pp}=0,98$ für $z=68,3\text{mm}$ und $r_{pp}=0,97$ für $z=137,6\text{mm}$ errechnet; die Werte für die LSA-Methode liegen geringfügig niedriger. Im Gegensatz zur Simulation wurde bei $z=137,6\text{mm}$ nicht die beste Korrelation erreicht. Als Ursache hierfür wird die Phasendrift bei der größeren Messdauer angenommen.

6. Diskussion und Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Simulation und der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die vorgestellten Rekonstruktionsfilter in der Lage sind, die Schallfeldstruktur aus räumlich gemittelten Messwerten weitgehend zu rekonstruieren. Eine weitere Verbesserung der experimentellen Ergebnisse ist zu erwarten, wenn anstelle der hier benutzten idealisierten Übertragungsfunktion des Hydrophons die reale, experimentell bestimmte Übertragungsfunktion für den Entfaltungsalgorithmus benutzt wird. Es erscheint daher realistisch, dass mit diesen Methoden auch die laterale Auflösung kommerzieller Hydrophone bei Ultraschallfrequenzen oberhalb von etwa 10MHz wesentlich verbessert werden kann.

Danksagung:

Einer der Autoren (TB) dankt dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur:

- [1] Ch. Koch, G. Ludwig, W. Molkenstruck, *Ultrasonics* 35 (1997) 297-303.
- [2] T. Boutkedjirt, R. Reibold, *Ultrasonics*, 38 (2000), 745-748.
- [3] T. Boutkedjirt, R. Reibold, *Fortschritte der Akustik, DAGA'98*, 530-531.
- [4] A.K. Jain, *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.
- [5] M.P. Ekstrom, *Digital Image Processing Techniques*, Academic Press, NY. 1983.