

Dreidimensionale Berechnung des transienten Schallfeldes von Ultraschallwandlern basierend auf einer schnellen Hybridtechnik

Božena Lamek, Frank Schubert

Fraunhofer- Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, 01109 Dresden

Email: bozena.lamek@izfp-d.fraunhofer.de

Einleitung

Zusammen mit der raschen Entwicklung der Computertechnik in den letzten Jahren gewinnen Simulationsrechnungen bei der Entwicklung spezieller Ultraschallwandler zunehmend an Bedeutung. Die Berechnungen basieren auf der Bereitstellung von Modellen für die Ausbreitung elastischer Wellen in Festkörpern. Diese Modelle sind nicht nur zur Auslegung von Ultraschallwandlern und Prüfsituationen, sondern auch zum Verständnis der physikalischen Effekte der Wellenausbreitung und zur Entwicklung inverser bildgebender Verfahren notwendig. Sie lassen sich entweder (halb) analytisch oder rein numerisch behandeln. Die wichtigsten Eigenschaften beider Simulationsmethoden fasst Tabelle 1 zusammen.

Tabelle 1: Eigenschaften halbanalytischer und numerischer Simulationsmethoden

Numerische Methoden	Halbanalytische Methoden
EFIT, FDTD, FEM,...	Punktquellensynthese, Greensche Funktionen, Integraltransformationmethoden
Meist Zeitbereichslösung	Meist Frequenzbereichslösung
Berücksichtigung aller Wellenphänomene (u.a. Oberflächenwellen, Mehrfachreflexionen, Modenumwandlung)	Näherungen (z.B. bestimmte Wellenphänomene werden vernachlässigt)
Für 3D-Simulationen: großer Zeit- und Speicherbedarf	Geringer Speicherbedarf, kurze Rechenzeiten

Bei der Modellierung und Optimierung von Ultraschallsensoren dominierten bislang aufgrund kurzer Rechenzeiten und geringen Speicherbedarfs die halbanalytischen Verfahren. Im vorliegenden Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Berechnung von Ultraschallwellenfeldern vorgestellt, bei dem die numerische EFIT-Methode (Elastodynamische Finite Integrationstechnik, [1]) mit dem Prinzip der Punktquellensynthese (Point Source Synthesis, PSS) kombiniert wird. Dies erlaubt die schnelle dreidimensionale Berechnung transienter Ultraschallfelder in beliebig geschichteten isotropen Medien [2].

Schallfeld einer Punktquelle

Der Ausgangspunkt für die Modellierung verschiedener Ultraschallsensoren mit der neuen Simulationstechnik ist das Schallfeld einer Punktquelle, das mithilfe des achsensym-

metrischen EFIT (CEFIT) berechnet wurde. Das Ergebnis zeigt Abbildung 1.

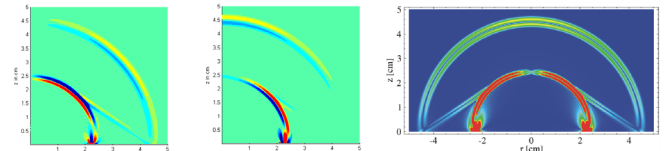


Abbildung 1: Schallfeld einer Punktquelle (breitbandige Normal-kraftanregung bis 3 MHz), achsensymmetrisches EFIT-Berechnung, Abstrahlung in Stahl; links: radiale Komponente der Teilchengeschwindigkeit (v_r), Mitte: axiale Komponente der Teilchengeschwindigkeit (v_z), rechts: Betrag der Teilchengeschwindigkeit ($|v|$).

Simulationsergebnisse für einen kreisförmigen Wandler

Die Wellenausbreitung in Stahl von einem kreisförmigen Ultraschallwandler mit dem Radius 10 mm wurde zuerst mit dem achsensymmetrischen EFIT berechnet und als Schnitt in der xz-Ebene dargestellt (Abbildung 2 links). Dann wurde dasselbe Problem mit der neuen EFIT-PSS-Technik berechnet (Abbildung 2 rechts). Zu diesem Zweck wurde der Wandlerbereich mit Punktquellen in kartesischen Koordinaten (x,y,z) diskretisiert. Anschließend wird das Prinzip der Punktquellensynthese angewendet: für jeden Punkt im Raum werden Komponenten der Teilchengeschwindigkeit (v_x , v_y , v_z) durch Aufsummierung der Beiträge von einzelnen Punktquellen der Prüfkopfapertur berechnet.

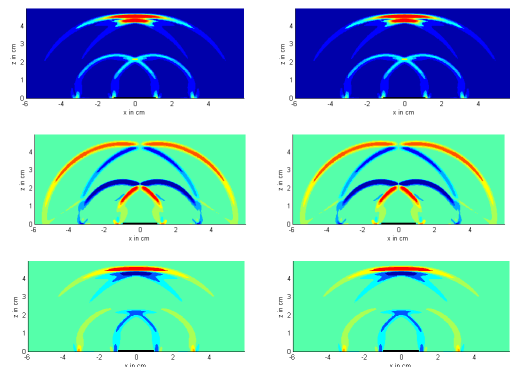


Abbildung 2: Vergleich der Ergebnisse für einen kreisförmigen Wandler mit dem Radius 10 mm (Schnitt in der xz-Ebene bei $y = 0$ mm); linke Spalte: achsensymmetrisches EFIT-Berechnung, rechte Spalte: EFIT-PSS, Zeilen: $|v|$, v_x , v_z .

Die Wellenausbreitungsvorgänge können auch als Querschnitt in der xy -Ebene dargestellt werden (Abbildung 3). Ein Vergleich der Berechnungen mit den beiden Techniken zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die Rechnung mithilfe der EFIT-PSS-Methode ist jedoch ca. 100mal schneller als die rein numerische CEFIT-Rechnung.

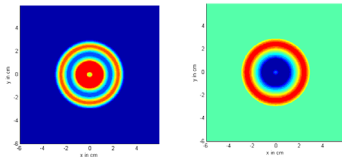


Abbildung 3: Ergebnisse der EFIT-PSS-Simulation für einen kreisförmigen Wandler mit $r = 10$ mm (Querschnitt in der xy -Ebene bei $z = 42$ mm); Betrag der Teilchengeschwindigkeit (links) und ihre z -Komponente (rechts).

Simulation für ringförmige Ultraschallwandler

In der Ultraschallprüfung werden oft Ringarrays eingesetzt, die aus einer Mehrzahl von ringförmigen Einzelementen bestehen. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der EFIT-PSS-Simulation für einen ringförmigen Wandler mit dem Innenradius von 6.5 mm und Außenradius von 8 mm.

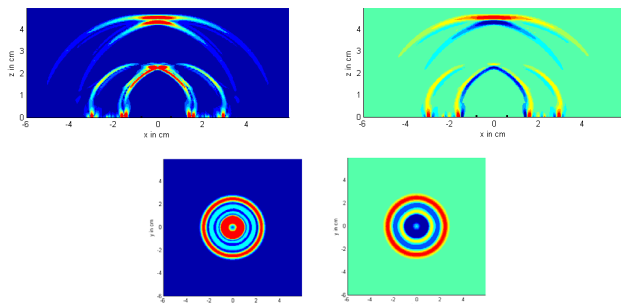


Abbildung 4: Ergebnisse der EFIT-PSS-Simulation für einen ringförmigen Wandler mit dem Innenradius von 6.5 mm und mit dem Außenradius von 8 mm; obere Zeile: Längsschnitt in der xz -Ebene bei $y = 0$ mm, untere Zeile: Querschnitt in der xy -Ebene bei $z = 42$ mm, links: Betrag der Teilchengeschwindigkeit, rechts: ihre z -Komponente.

Modellierung eines Rechteckwandlers

Die gerade vorgestellten achsensymmetrischen Simulationsprobleme können effektiv mit dem achsensymmetrischen EFIT berechnet werden und dienen hauptsächlich zum Testen der neuen Simulationstechnik. Ganz anderes ist es bei der Modellierung eines Rechteckwandlers. Dieses Problem müsste bei EFIT explizit dreidimensional betrachtet werden. Dadurch ergibt sich ein wesentlich höherer Rechen- und Speicherbedarf. Mithilfe der neuen Hybridtechnik dagegen dauert die Rechnung auf einem handelsüblichen PC nur wenige Sekunden. Abbildung 5 zeigt einen Schnitt in der xz - bzw. yz -Ebene für einen Rechteckwandler mit der Elementbreite 1.5 mm in x -Richtung und 8 mm in y -Richtung. Im xz -Schnitt sieht man, dass es keine Fokussierung der Longitudinalwelle gibt solange die entsprechende Elementbreite viel kleiner als die Wellenlänge ist. In der yz -Ebene ist dagegen eine deutliche Fokussierung der Transversalwelle bemerkbar. Zusätzlich treten deutlich separierte Kantenwel-

len von den Kanten des Elementes auf. Abbildung 6 zeigt zusätzlich den Schnitt in der xy -Ebene bei $z = 42$ mm. Hier ist eine höhere Amplitude der Welle in der x -Richtung ersichtlich, was sich durch größere Elementbreite in y -Richtung erklären lässt.

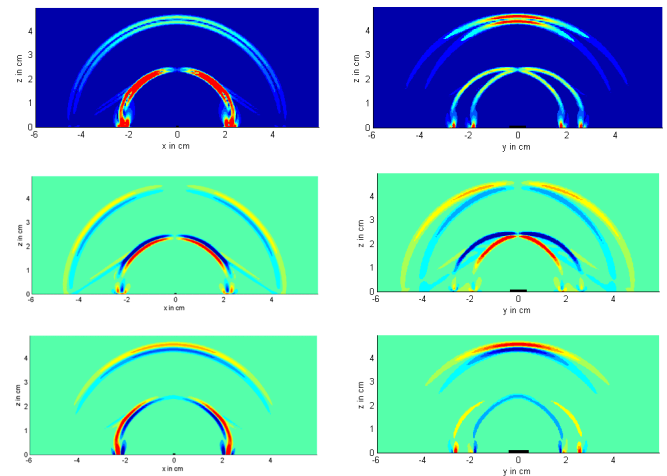


Abbildung 5: Schallfeld für einen Rechteckwandler, Elementbreite 1.5 mm in x -Richtung und 8 mm in y -Richtung; linke Spalte: Schnitt in der xz - ($y = 0$ mm), rechte Spalte: Schnitt in der yz -Ebene ($x = 0$ mm), Zeilen (von oben nach unten): Betrag der Teilchengeschwindigkeit, ihre x - und z -Komponente.

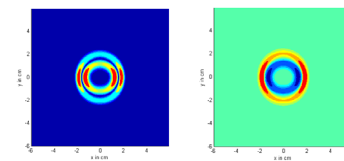


Abbildung 6: Schallfeld für einen Rechteckwandler, Elementbreite 1.5 mm in x -Richtung und 8 mm in y -Richtung (Querschnitt in der xy -Ebene bei $z = 42$ mm); Betrag der Teilchengeschwindigkeit (links) und ihre z -Komponente (rechts).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der neuen Simulationstechnik wurden Berechnungen für verschiedene Ultraschallwandler durchgeführt und mit Referenzrechnungen verglichen. Die Berechnungsergebnisse können als Wellenfrontbilder zu einem bestimmten Zeitpunkt, als Schallfeldanimationen sowie als Zeitsignale an einer bestimmten Stelle im Lastmedium dargestellt werden. Zukünftige Erweiterungen der neuen Simulationstechnik haben das Ziel, das Hybridkonzept auf Gruppenstrahler zu erweitern und somit schnelle dreidimensionale Designstudien für Phased-Array-Anwendungen zu ermöglichen.

Literatur

- [1] Schubert F., Peiffer A., Köhler B., Sanderson T., The elastodynamic finite integration technique for waves in cylindrical geometries, *J. Acoust. Soc. Am.* 104(5) 1998
- [2] Schubert F., Lamek B., 3D ultrasonic transducers modeling using the Elastodynamic Finite Integration Technique in combination with point-source-synthesis, *Proc. of 4th International Workshop "NDT in Progress"*, November 7-9, 2007, Prague, Czech Republic