

Akustische Sensoren für die Zerstörungsfreie Prüfung und die medizinische Diagnostik

E. Kühnicke

TU Dresden, Institut für Akustik u. Sprachkommunikation; Email: elfgard.kuehnicke@ias.et.tu-dresden.de

Einleitung

In der zerstörungsfreien Prüfung und in der medizinischen Diagnostik sind Ultraschalluntersuchungen weit verbreitet. Meist wird mit der Impuls-Echo-Methode gearbeitet, das bedeutet, daß das von dem Fehler bzw. den Organgrenzen reflektierte Signal empfangen und ausgewertet wird. Die Qualität bzw. sogar die Durchführbarkeit der Untersuchung hängt davon ab, ob das Schallfeld im Untersuchungsobjekt an der zu untersuchenden Stelle fokussiert ist und ob das Objekt unter dem gewünschten Einschallwinkel getroffen wird. Nebenstrukturen sind unerwünscht, da sie Fehlbewertungen verursachen können. Da das Schallfeld durch schrägliegende und gekrümmte Grenzflächen abgelenkt, fokussiert bzw. defokussiert wird, hängt es sowohl von den Parametern des Schallkopfs, als auch von den Parametern des Ausbreitungsmediums ab.

Um das Schallfeld für das entsprechende Problem zu berechnen und Schallköpfe zu optimieren, wurden Simulationsprogramme entwickelt. Sie beruhen auf einer Separationsmethode, d.h. einer separaten Berechnung der Wellenausbreitung in jeder einzelnen Schicht mit Hilfe von GREENSchen Funktionen. Das Feld für den ausgedehnten Wandler wird durch Superposition der Felder aller Punktquellen gewonnen [1].

Schallfeldberechnung

Einfluß der verschiedenen Schallkopfparameter sowie der Parameter des Untersuchungsobjektes auf das Schallfeld

Das Schallfeld eines Schallkopfes hängt von seinen Parametern ab. So wird durch den Keilwinkel der Einschallwinkel in das Untersuchungsobjekt festgelegt. Die Schwingergröße und -form und die Anregungsfrequenz bestimmen die Lage des natürlichen Fokus, die sich für einen runden Schwinger gut mit der aus dem RAYLEIGHintegral abgeleiteten Formel für die Nahfeldlänge $N = d^2/4\lambda$ (N -Nahfeldlänge, d -Schwingerdurchmesser, λ - Wellenlänge) berechnen läßt. Zusätzlich hängt bei Stoßwellenprüfköpfen das Aussehen des Nahfeldes vom zeitlichen Verlauf der Anregung ab. Bei Verwendung von Sende- Empfangs- (SE-) Prüfköpfen kann durch den Dachwinkel der Schnittpunkt von Sende- und Empfangsbündel gewählt werden. Durch Linsen bzw. Verwendung von gekrümmten Schwingern ist zusätzlich zu fokussieren.

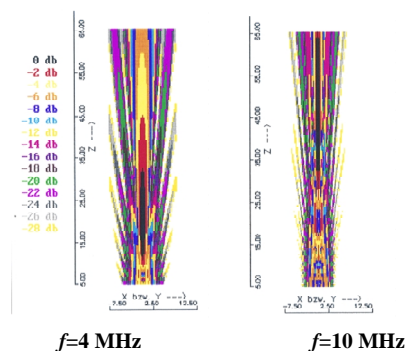


Abbildung 1: Schallfeld in Wasser für zylindrisch fokussierenden Prüfkopf (Schwinger: $d=6$ mm, $f_{\text{geom}}=50$ mm)

Die Abhängigkeit des Schallfeldes von Schwingergröße und Frequenz sowie von Keil- und Dachwinkel wird ausführlich in [2] diskutiert. Es wird gezeigt, daß das SNELLIUSSche Brechungsgesetz völlig falsche Winkel liefern kann. Hier soll näher auf fokussierende Schallköpfe eingegangen werden. Bei einem fokussierendem Schallkopf ergibt sich die resultierende Fokusslage aus dem geometrischen Fokus der Linse und dem natürlichen Fokus. Abb.1 zeigt

die berechneten Schallfelder (z-Komponente der Verschiebung, Längsschnitte in Symmetrieebene) für fokussierende Schallköpfe der gleichen Schwingergröße und der gleichen Linsenkrümmung bei unterschiedlichen Frequenzen von 4 MHz und 10 MHz. Die entsprechenden Nahfeldlängen ergeben sich zu $N=24$ mm bzw. $N=60$ mm. Aus Abb.1 wird deutlich, daß

- in eine bestimmte Tiefe fokussiert werden kann (Abb.1b)
- der resultierende Fokus auch vom natürlichen abhängt und nur vor und nicht hinter diesem liegen kann (Abb. 1a).

Auch in das extreme Nahfeld sollte nicht fokussiert werden, da dann Nahfeldeigenschaften mit Minima und Maxima nach dem Fokus auftreten und es zu einer Aufspaltung in empfindliche Zonen kommen kann (Abb. 2). Abb.2 zeigt außerdem, wie z.B. durch Änderung der Vorlaufstrecke die Lage der empfindlichen Zone zu variieren ist.

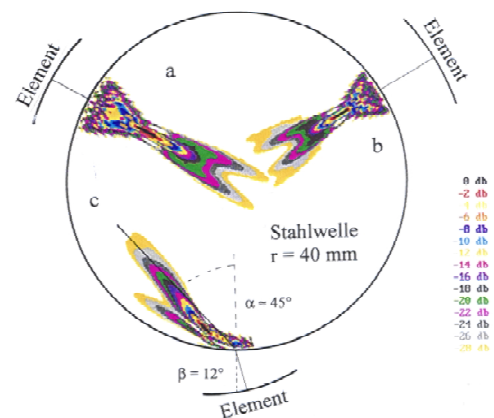
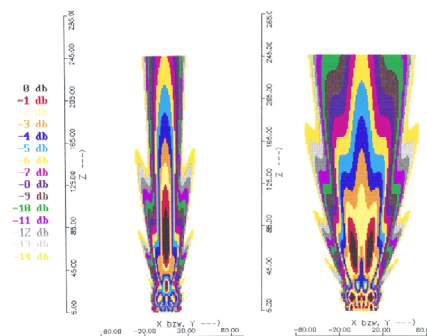


Abbildung 2: Schallfeld eines gekrümmten Folienschwingers (Folienradius: $r=40$ mm, Wandlerlänge: $a=22$ mm) in einer Stahlwelle $r=40$ mm bei unterschiedlichem Wasservorlauf: a) , c) 10 mm b) 15 mm c) Schrägeinschallung

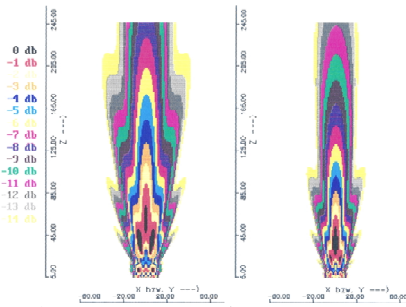
Anpassung von Schallköpfen an das Prüfproblem

Zur Prüfung von Stahlwellen wird ein Wandler mit der Kantenlänge von 24 mm verwendet. Abb.3a zeigt das Schallfeld in Stahl beim Aufsetzen auf eine ebene Oberfläche. Dieses Schallfeld verändert sich stark, wenn der Schallkopf zum Prüfen von Stahlwellen verwendet wird (Abb.3b). Die empfindliche Zone splittet in zwei empfindliche Zonen außerhalb der Symmetrieebene auf, die



Oberfläche: a) eben b) gekrümmt $r=90$ mm
Druck im Max.:14,0

Abbildung 3: Einfluß von gekrümmter Oberfläche auf das Schallfeld (Wandler: 24 mm·24 mm, $f=2$ MHz, Plexiglasvorlauf)



Wandlergröße: 20 mm·20 mm 16 mm·16 mm
Druck im Max. (norm.): 13,0 14,4

Abb.4: Wandleranpassung: Welle $r=90$ mm

dichter am Schallkopf liegen. Dieses führt zu Fehlinterpretationen bezüglich der Lage und Größe des Fehlers. Der Vergleich von Abb.3b und Abb.4 zeigt, wie durch Verkleinerung der Schwingergöße, bei gleichbleibendem Schalldruck im Fokus, der Schallkopf an die Prüfung bei gekrümmten Grenzflächen anzupassen ist.

Abb.5 zeigt berechnete, harmonische Schallfelder in einer Stahlwelle, die von einem Prüfkopf mit einem Schwinger der Kantenlänge 24 mm bei unterschiedlichen Frequenzen ausgesendet werden. Ein Vergleich der Schallfelder ergibt, daß die Fokussierung sehr stark von der Frequenz abhängt und daß sich der Fokus mit zunehmender Frequenz vom Sender entfernt. Gleichzeitig splittet die empfindliche Zone in zwei empfindliche Zonen außerhalb der Symmetrieebene auf.

Das transiente Schallfeld ist eine Faltung zwischen der Impulsantwort des Systems und der Anregungsfunktion des Wandlers. Es läßt sich durch eine Überlagerung harmonischer Schallfelder (harmonische Synthese) entsprechend der Zeitanregung des Eingangssignals bestimmen. Abb.6 zeigt das transiente Schallfeld bei einer Mittenfrequenz von 2 MHz für Zeitanregungen mit einer Sinus-Schwingung von 1, 2 und 5 Perioden. Das transiente Schallfeld ist dem harmonischen Schallfeld bei der Mittenfrequenz

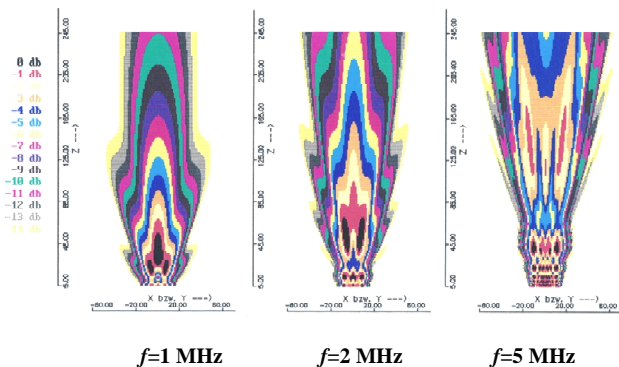
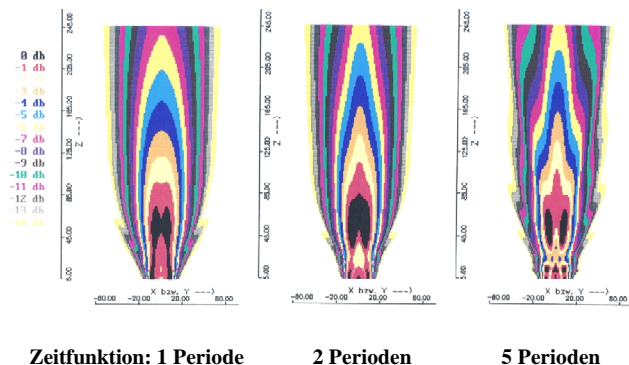


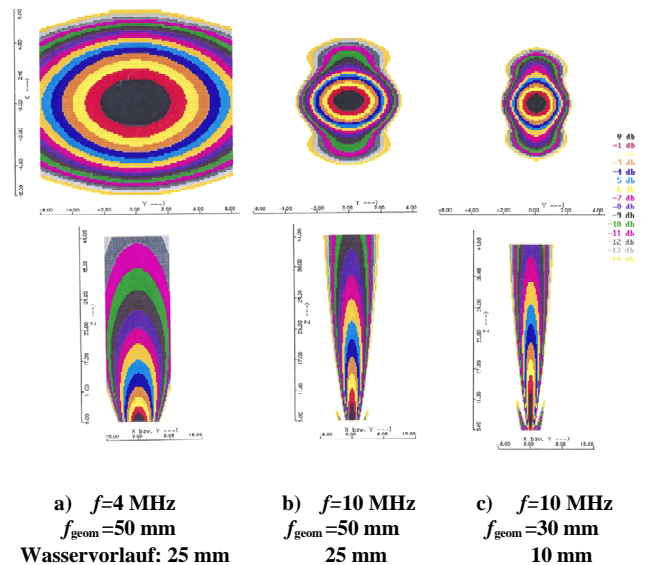
Abbildung 5 :Harmonische Schallfelder in Welle $r=90$ mm (Wandler 24 mm·24 mm)



Zeitfunktion: 1 Periode 2 Perioden 5 Perioden
Abbildung 6: Transiente Schallfelder in Welle $r=90$ mm (Wandler 24 mm·24 mm, $f_{\text{Mittle}}=2$ MHz)

ähnlich (vergleiche mit Abb.5 $f=2$ MHz), es zeigt die gleiche Nahfeldlänge und damit die gleiche Lage der empfindlichen Zone (den gleichen Fokusbereich). Bei kurzen Anregungen werden Minima im Nahfeldbereich und Nebenstrukturen geringer, verschwinden aber im Gegensatz zum Feld eines ebenen, unfokussierten Schallkopfs nicht vollständig (/1/ S.222 ff.). Das harmonische Feld bei der jeweiligen Mittenfrequenz ist eine gute Näherung für das transiente Schallfeld und sagt eventuell auftretende Nebenstrukturen bei längeren Anregungen gut voraus. Aus diesem Grund erfolgen die Simulationsrechnungen zur Anpassung von Schallköpfen mit Hilfe harmonischer Rechnungen.

Im folgenden wird die Entwicklung eines angepaßten Prüfkopfs zur Prüfung einer Preßverbindung in Immersionstechnik gezeigt. Um eine gute laterale Auflösung an der Verbindung zu erhalten, muß die Fokussierung auf die Grenzfläche zwischen Welle und Nabe erfolgen. Die empfindliche Zone sollte an dieser Stelle möglichst klein sein. Ein Vergleich der Schallfelder von Prüfköpfen, die die gleiche Schwingergöße und die gleiche Linsenkrümmung besitzen, zeigt, daß ein 10-MHz-Prüfkopf gegenüber Prüfköpfen mit einer kleineren Anregungsfrequenz die kleinste empfindliche Zone und damit das größte Auflösungsvermögen an der Grenzfläche zwischen Welle und Nabe besitzt (Abb.7a, b). Da bei dem 10-MHz-Prüfkopf im Längsschnitt die empfindliche Zone zu weit von der Grenzfläche entfernt ist (Abb.7b), muß durch eine Verringerung des Wasservorlaufs oder eine Verringerung der Fokussierung die empfindliche Zone auf dieser Grenzfläche plaziert werden. Das Schallfeld Abb.7c zeigt, daß durch die Verkürzung des Wasservorlaufs und eine zusätzlichen Fokussierung eine Verbesserung der Auflösung erzielbar ist.



a) $f=4$ MHz b) $f=10$ MHz c) $f=10$ MHz
 $f_{\text{geom}}=50$ mm $f_{\text{geom}}=50$ mm $f_{\text{geom}}=30$ mm
Wasservorlauf: 25 mm 25 mm 10 mm

Abbildung 7: Schallfeld für zylindrisch fokussierenden Prüfkopf (Schwingerdurchmesser $d=6$ mm); Oben: an Grenzfläche zwischen Welle und Nabe, Unten: Längsschnitt in Nabe (Nullpunkt des Koordinatensystems an der Oberfläche der Nabe, Vernachlässigung der Grenzfläche zur Welle)

Referenzen

- [1] E. Kühnicke: Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen; Modellierungen mit Hilfe von Integraltransformationmethoden; Simulationsrechnungen für Ultraschallanwendungen, Bonn 2001, ISBN 3-934244-01-7.
- [2] E. Kühnicke, Brechung von begrenzten Schallbündeln, DAGA 2000, 26. Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, 27.-30.3.2000, Fortschritte in der Akustik.