

# Optimierung der Richtcharakteristik von Ultraschall-Arrays

Elfgard Kühnicke

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland,

Email: [elfgard.kuehnicke@ias.et.tu-dresden.de](mailto:elfgard.kuehnicke@ias.et.tu-dresden.de)

## Einleitung

Bei der Ultraschall-Prüfung ist eine anwendungsbezogene Anpassung des Prüfverfahrens und des Ultraschallwandlers an die Geometrie des zu prüfenden Objektes und die Lage des Fehlers erforderlich. Für solche Optimierungsaufgaben wurden schnelle Simulationsprogramme entwickelt. Das eine simuliert das harmonische und das zweite das transiente Schallfeld für eine breitbandige Anregung. In [1,2] wird gezeigt, dass der Unterschied zwischen transientem und harmonischem Schallfeld bei der Mittenfrequenz des transienten gering ist. Deshalb ist es möglich, breitbandige Prüfköpfe durch Berechnung des harmonischen Schallfeldes zu optimieren. Das transiente Schallfeld findet nur zur Validierung Verwendung. Diese Art der Optimierung soll hier auf breitbandige Ultraschall-Arrays angewendet werden.

## Algorithmus zur Schallfeldberechnung

Das harmonische Schallfeld für mehrschichtige Probleme mit nicht-parallelen und gekrümmten Grenzflächen kann mit Hilfe einer Separationsmethode in Verbindung mit einer Punktquellensynthese und genäherten harmonischen GREEN-schen Funktionen berechnet werden. Separationsmethode bedeutet eine Zerlegung des geschichteten Mediums in einzelne Schichten und eine separate Feldberechnung in jeder Schicht [3,4]. Das transiente Schallfeld lässt sich mit Hilfe einer harmonischen Synthese (Überlagerung der harmonischen Felder bei den verschiedenen Frequenzen) und einer Faltung mit der Anregungsfunktion bestimmen [1].

Dieser Algorithmus ist verwendbar, um das Schallfeld für die einzelnen Array-Elemente zu berechnen. Das Feld des Arrays ergibt sich aus der Überlagerung der zeitverzögerten Schallfelder der Einzelelemente. Durch geeignete Wahl eines Verzögerungs-Zeitregimes sind Arrays in einem Skan- oder Fokussierungsmodus zu betreiben.

## Simulationsbeispiele

An 2 Beispielen, einem ebenen Array zur Prüfung von Halbzeugen in Tauchtechnik und einem konvex gekrümmten Array zur Innenrohrprüfung, werden wichtige Eigenschaften des Schallfeldes erklärt und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen Längsschnitte des Schallfeldes in Wasser. Das Koordinatensystem ist am Array angeheftet, so dass die z-Koordinate den Abstand zum Array angibt. In einigen Abbildungen ist das normierte Schalldruckmaximum  $p$  einschließlich seiner Koordinaten (x,y,z) angegeben. Mit  $\beta$  wird der entsprechend der Zeitverzögerung eingestellte Schwenkwinkel bezeichnet;  $\alpha_m$  ist der Einschallwinkel der Hauptkeule, also der verwirklichte Schwenkwinkel bezüglich der z-Koordinate.  $\alpha_g$  ist der Winkel der Nebenkeule. Der Gitterabstand  $g$  (=Mittenabstand zwischen den Elementen) und die Verzögerungszeit  $\Delta t$  zwischen zwei Elementen werden als Funktionen der Wellenlänge  $\lambda$  bzw. der Periodendauer  $T$  angegeben. Das ebene Array besitzt 16 Elemente mit einer Breite  $b=0.9\text{mm}$  und einer Tiefe von

10mm (x-Richtung), einem Mittenabstand der Elemente  $g=1\text{mm}$  und einer Frequenz  $f=3.0\text{MHz}$ . Damit ist der Elementabstand für Wasser  $2\lambda$  und für Stahl  $\lambda/2$ . Beim Schwenken werden die einzelnen Elemente durch eine zeitverzögerte Ansteuerung scheinbar in z-Richtung um  $\Delta h$  verschoben und auf einem Keil mit dem Keilwinkel  $\beta$  platziert

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{c} = \frac{g \cdot \tan \beta}{\lambda} T; \quad c - \text{Wellengeschwindigkeit} \quad (1)$$

Die Elemente des Arrays schallen dadurch unter dem Winkel  $\beta$  in das Medium ein.

Die Überlagerung aller Schallfelder bei den unterschiedlichen Frequenzen und eine spektrale Multiplikation mit der Anregungsfunktion führt zum zeitabhängigen Schallfeld eines breitbandigen Arrays. Abb.1a-c zeigt die Felder von 3 Frequenzanteilen und Abb.1d das zeitabhängige Feld bei einer Mittenfrequenz  $f_M=3\text{MHz}$  und einer Anregung der Elemente mit einer gefensterten sin-Funktion von 3 Perioden. Das harmonische Schallfeld ( $f=3\text{MHz}$ ) bei der Mittenfrequenz des transienten (Abb.1b) stimmt gut mit dem transienten Schallfeld überein. Es gibt die richtige Lage der empfindlichen Zone und den richtigen Schwenkwinkel an. Aus Abb.1a-c lassen sich auch die Probleme beim Schwenken erkennen:

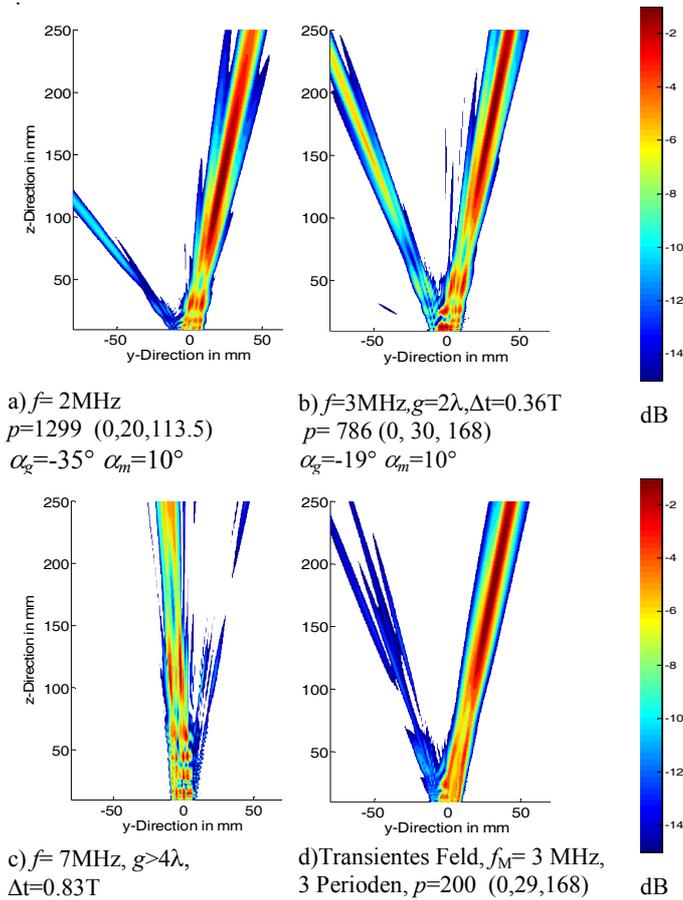
1. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Intensität der Nebenkeulen stark zu.
2. Damit sich zwei Wellenzüge nicht auslöschten, ist die maximal mögliche Verzögerungszeit zwischen zwei benachbarten Elementen auf  $\Delta t \leq 0,48T$  begrenzt.

Für Anstrich 2. ergibt sich aus Gleichung (1) ein maximal möglicher Schwenkwinkel  $\beta$ . Wird die Verzögerungszeit von  $\Delta t \leq 0,48T$  überschritten, reagiert das Array im Extremfall nicht mehr auf die Ansteuerung (Abb.1c).

Um die Eigenschaften der Nebenkeulen genauer zu untersuchen, wird das Array als Gitter mit der Gitterkonstante  $g$  betrachtet. Entsprechend wellenoptischer Überlegungen tritt die erste Nebenkeule bei dem Winkel  $\phi$  auf.

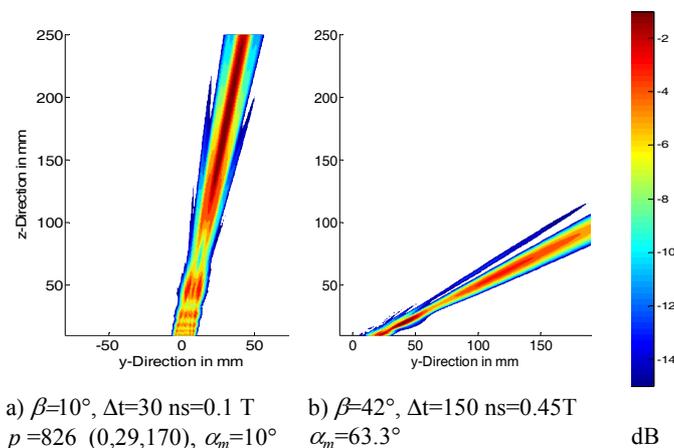
$$\sin \phi = \pm \frac{\lambda}{g} \quad (2)$$

Für die obigen Bedingungen ( $g=1\text{mm}$ , Wasser) müsste die ersten Nebenkeule für  $f=2\text{MHz}$  und  $f=3\text{MHz}$  unter Winkeln von ca.  $48.5^\circ$  bzw.  $30^\circ$  auftreten. Obwohl bei Gleichung (2) von einem in der Tiefe unendlich ausgedehnten Gitter ausgegangen wird, stimmen diese Winkel für die Nebenkeulen recht gut mit den Winkeln aus den Schallfeldberechnungen ( $\phi=a_m-a_g$ ) für endlich ausgedehnte Elemente überein (siehe auch Fig.1). Die Schallfeldberechnungen in [5] machen deutlich, dass der Winkel zwischen Haupt- und Nebenkeule unabhängig vom Schwenkwinkel ist. Die Intensität der Nebenstrukturen wächst mit größerem Schwenkwinkel und mit kleiner werdender aktiver Schwingfläche (bei  $g=\text{const.}$ ).



**Abbildung 1:** Harmonische Felder und transientes Feld, ebenes Array (16 Elemente,  $b=0.9\text{mm}$ ,  $g=1\text{mm}$ ,  $\beta=10^\circ$ ,  $\Delta t=117\text{ns}$ ).

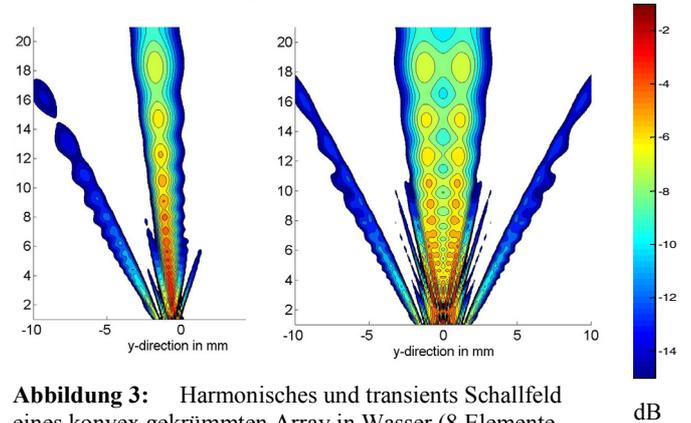
Abb.2a zeigt das harmonische Schallfeld für  $\beta=10^\circ$  ( $f=3\text{MHz}$ ) bei einem Gitterabstand  $g=0.25\text{mm}$ . Sowohl im harmonischen als auch im transienten Schallfeld [5] treten keine Nebenkeulen auf, weil ein Elementabstand von  $\lambda/2$  eingehalten wird. Diese Feststellung bestätigt sich auch für größere Schwenkwinkel (Abb.2b). Hier wurde mit einer Verzögerungszeit von  $\Delta t=0,48T$  zwischen den einzelnen Elementen für  $f=3\text{MHz}$  der maximale Schwenkwinkel von  $\beta=42^\circ$  eingestellt. Vergleicht man  $\beta$  mit dem erreichten Schwenkwinkel  $\alpha_m=63^\circ$ , so stellt man eine Differenz von  $21^\circ$  fest.



**Abbildung 2 :** Harmonisches Schallfeld für ebenes Array (64 Elemente,  $b=0.21\text{mm}$ ,  $g=0.25\text{mm}$ ,  $f=3\text{MHz}$ ).

Bei dem konvex gekrümmtes Array sind 8 Elementen auf einem Zylinder mit dem Radius  $r=3.5\text{mm}$  angeordnet. Das konvex gekrümmte Array strahlt ein defokussiertes Schallfeld in Wasser ab. Abb.3 zeigt das Schallfeld für dieses Array

bei einer Ansteuerung, die dem Ausgleich der Krümmung entspricht. Entsprechend den geometrisch berechneten Verzögerungszeiten ist zu erwarten, dass das Array wie ein ebener Wandler abstrahlt und jede Arrayhälfte parallel zur z-Achse einschallt. Die Schallfelder in Abb.3 belegen, dass der Ausgleich der Krümmung nicht erreicht wird, d.h., geometrische Betrachtungen zur Bestimmung der Verzögerungszeiten genügen nicht. Weitere Berechnungen zeigen, dass das hauptsächlich an der Lage der einzelnen Elemente im Raum liegt. Da sie auf einem Zylindermantel und nicht in einer Ebene liegen, strahlen sie nicht in Vorwärtsrichtung der Welle des Gesamtarrays ab.



**Abbildung 3:** Harmonisches und transientes Schallfeld eines konvex gekrümmten Array in Wasser (8 Elemente,  $r=3.5\text{mm}$ ,  $b=0.3\text{mm}$ ,  $g=0.33\text{mm}$ )

### Schlussfolgerungen

Zur Optimierung der Arrayparameter und der Ansteuerung sind Berechnungen des harmonischen Schallfeldes sehr gut anwendbar. Geometrische Berechnungen der Verzögerungszeit ergeben häufig falsche Ansteuerungen, da sie Nebenkeulen, die Größe und räumliche Lage der Elemente nicht berücksichtigen. Sie können nur die Ausgangsdaten liefern. Um eine korrekte Ansteuerung zu erreichen und Nebenkeulen zu vermeiden, ist ein Elementabstand von  $\lambda/2$  einzuhalten. Zusätzlich wird bei solch schmalen Elementen auch der Einfluss ihrer bzgl. Ausbreitungsrichtung falsche Lage im Raum minimiert, was sich besonders bei gekrümmten Arrays auswirkt.

### Literatur

[1] E. Kühnicke: Optimized calculations of transient wave fields for transducer design, 1997 IEEE International Ultrasonics Symposium, Toronto, 5.-8. October 1997, Proceedings pp. 967-970.

[2] E. Kühnicke: Relation between transient and harmonic field of ultrasound transducers for NDT – problems, 3<sup>rd</sup> Workshop “NDT in Progress”, Prag, 10.-12. October 2005, Proceedings.

[3] E. Kühnicke: Three-dimensional waves in layered media with non-parallel and curved interfaces - A theoretical approach, J. Acoust. Soc. Am. 100(2), pp.709-716, 1996.

[4] E. Kühnicke: Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen; Modellierungen mit Hilfe von Integraltransformationmethoden; Simulationsrechnungen für Ultraschallanwendungen, Bonn 2001, ISBN 3-934244-01-7.

[5] E. Kühnicke: A fast algorithm for the optimization of arrays, 2005 IEEE International Ultrasonics Symposium, Rotterdam, 19.-21. September 2005, Proceedings