

Vergleich der Schallfelder handelsüblicher Leistungultraschallwandler R. Sobotta, Elma GmbH & Co KG, Singen

Das Schallfeld eines einzelnen Ultraschall-Wandlerelementes entspricht näherungsweise dem eines schallharten Kolbenstrahlers. In Abbildung 1 ist der Schalldruckpegel in einer senkrechten Ebene zum Wandlerelement mit $kr=3.6$ (Wellenzahl k , Radius r) bei freier Schallausbreitung dargestellt. Das Element befindet sich mittig an der linken unteren Kante. Man erkennt die Bündelung des Elementes und die Schalldruckpegelabnahme mit der Entfernung. Kommt

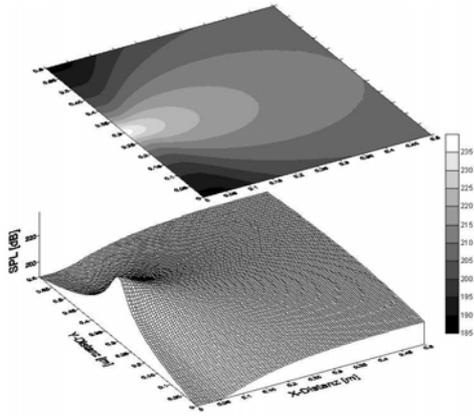


Abb. 1 Schalldruckpegel (oben als Konturplot Skala in dB) vor einem Wandlerelement bei freier Schallausbreitung ($kr=3.6$)

nun eine schallweiche Reflektion z. B. an einer gegenüberliegenden Wasseroberfläche zustande, bildet sich eine Stehwelle aus. Abbildung 2 zeigt die Schalldruckpegelverteilung vor einem Wandlerelement mit einer gegenüberliegenden Reflektion. Da bei Ultraschallgeräten grundsätzlich auch eine seitliche Begrenzung der Geometrie auftritt, müssen auch in diesen Richtungen Reflektionen berücksichtigt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Reflektionen an 5 Seiten und 4 Kanten wurden berücksichtigt und führen zu einer Schalldruckverteilung, die durch Maxima und Minima in allen Raumrichtungen geprägt ist.

Um die notwendige akustische Leistung in einem Schallfeld zur Verfügung zu stellen, werden in der Regel mehrere Wandlerelemente verwendet. Die Geometrie und Anordnung der Elemente spielt dabei eine große Rolle für die Schalldruckverteilung. Betrachten wir zuerst einen Wandler mit 5×5 rechteckig angeordneten Elementen, die alle gleichphasig und mit gleicher Amplitude Leistung abstrahlen. Abbildung 4 a) vermittelt einen Eindruck von der Schalldruckpegelverteilung senkrecht zum Wandler auf der

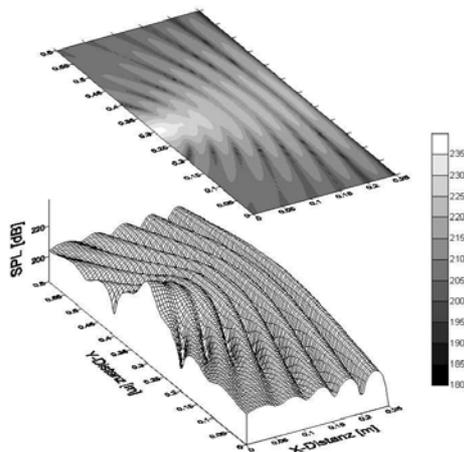


Abb. 2 Schalldruckpegel vor einem Wandlerelement mit einer gegenüberliegenden Reflektion

Mittelebene bei freier Schallausbreitung. Wenn die Einzelemente relativ dicht angeordnet sind ergibt sich eine Schalldruckverteilung, die der eines gleich großen starren rechteckförmigen Kolbenstrahlers ähnelt. Bei großen Elementabständen ist die Abstrahlcharakteristik des Einzelementes allerdings deutlich im Schalldruckpegel des gesamten Wandlers zu erkennen. Zusätzlich entstehen Stehwellen zwischen den Elementen.

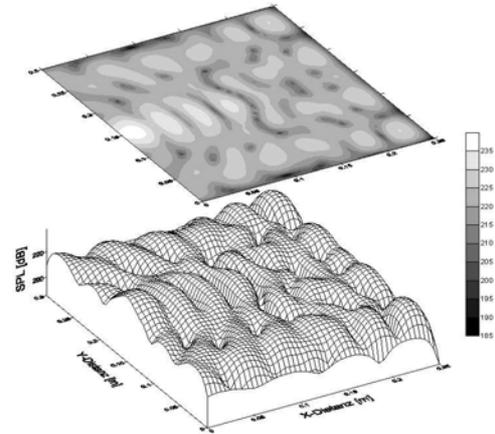


Abb. 3 Schalldruckpegel vor einem Wandlerelement mit allseitigen Reflektionen

Um die Verteilung und Höhe der Maxima und Minima des Schalldruckfeldes zu beeinflussen, kann die Amplitude und Phase der Einzelemente variiert werden. Auf eine Amplitudenanpassung wird allerdings in der Regel verzichtet, da die Einzelemente leistungsmäßig nicht optimal ausgelastet werden können. Die Anpassung der Phase ist auf einfache Art und Weise durch 180° Phasendrehung realisierbar. Wenn die Elemente in definiertem Abstand jeweils mit 180° Phasendrehung betrieben werden, ergibt sich eine Schalldruckpegelverteilung im Nahfeld des Wandlers entsprechend Abb. 4 b). Für diese Schallfeldberechnung wurden wieder 5×5 Elemente rechteckig angeordnet, wobei benachbarte Elemente jeweils eine Phasendrehung von 180° aufweisen. Betrachtet man den Schalldruckpegel in einer zum Wandler parallelen Ebene, so erkennt man die säulenartige Struktur der Schalldruckmaxima. Die maximale Reichweite der Schalldruckmaxima ist nicht ganz so groß wie bei gleichphasiger Ansteuerung. Dafür ist aber die Verteilung der Minima und Maxima optimal gleichmäßig.

Die von den Wandlerelementen abgegebene Leistung teilt sich allerdings auf. Zum einen nimmt das Schallfeld über den Realteil der Strahlungsimpedanz Leistung auf und zum anderen wird Leistung an die Biegewelle, die sich auf dem Blech ausbreitet, abgegeben.

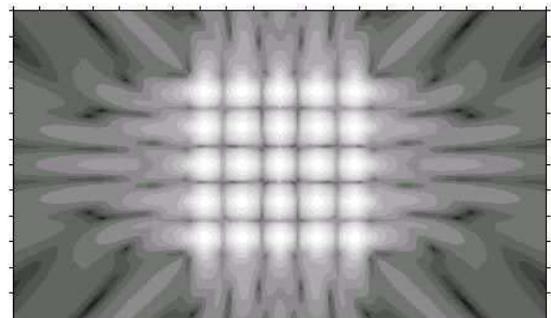
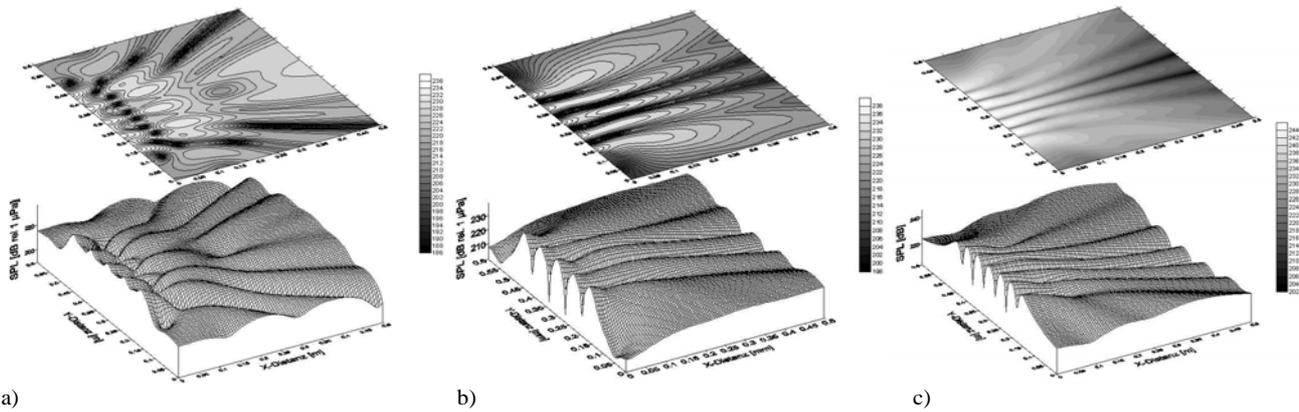


Abb. 5 Schalldruckpegel eines Verbundschwingers parallel zum Wandler (hell = Maximum)



a) Abb. 4 Schalldruckpegel vor einem Ultraschallwandler mit a) gleichphasiger Bestückung, b) gegenphasiger Bestückung bzw. Verbundschall und c) einem Rohrschwinger

Bildet man das Verhältnis der Biegewellenimpedanz zur Summe des Realteils der Strahlungsimpedanz eines Einzelelementes und der Biegewellenimpedanz in Abhängigkeit von der Blechdicke, so ergibt sich daraus der Anteil der Biegewellenleistung. Da der Realteil der Strahlungsimpedanz eines Kolbenstrahlers für $kr > 1$ eine gewisse Welligkeit aufweist, ist in Abbildung 6 das Minimum und das Maximum dieser Funktion dargestellt.

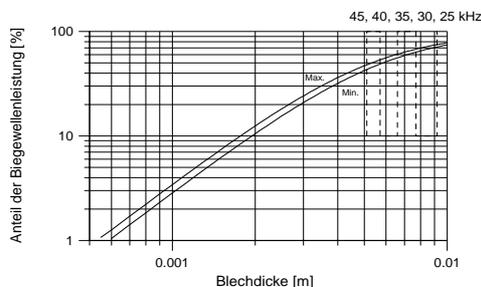


Abb. 6 Anteil der Biegewellenleistung in Abhängigkeit von der Blechdicke (Stahl) für ein Wandlerelement (--- Koizidenzfrequenzen)

Bei sehr dünnem Blech wird wenig Leistung an die Biegewelle abgegeben. Allerdings ist die Biegewellenlänge bei dünnem Blech so klein, dass keine Leistung von der Biegewelle ins Fernfeld abgestrahlt werden kann. Aus Abbildung 6 ist somit zu entnehmen, dass bei einer Blechstärke von 3 mm ca. 22 % der Leistung von der Biegewelle aufgenommen werden und als Verlustleistung angesehen werden müssen. Für eine Frequenz von 25 kHz müsste die Blechdicke mindestens 9.5 mm betragen, wenn die Biegewelle abgestrahlt werden soll.

Es ist nun nicht sinnvoll, so massive Stahlbleche zu verwenden. Daher wurde ein Verbundaufbau aus Stahl und Aluminium gewählt, der eine effektive Dicke von mehr als 10 mm bei 25 kHz-Wandlern hat. Der Verbundaufbau und bei der erwünschten gegenphasigen Schwingungsform ist in Abbildung 7 dargestellt. Da bei Verbundschwinger keine Verlustleistung durch Biegewellen entsteht, ist der Wirkungsgrad entsprechend höher.

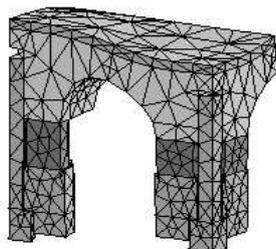
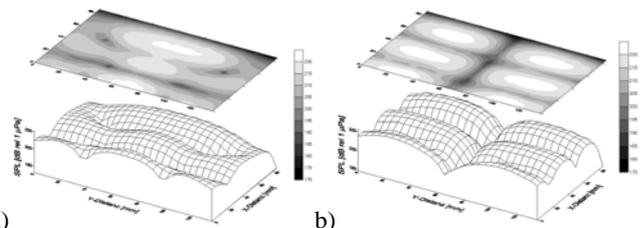


Abb. 7 Aufbau und Schwingungsform eines Verbundschwingers

Eine andere Möglichkeit, Biegewellenabstrahlung zu nutzen, besteht darin, eine Dehnwelle auf einem dickwandigen Rohr oder Stab zu erzeugen. Die abstrahlende Länge des Rohres wird dazu so gewählt, dass eine Stehwelle entsteht. An einer geeigneten Stelle wird ein Wandlerelement an das Rohr gekoppelt und das Rohr an den Enden entsprechend abgeschlossen. Die Einkoppelstelle kann an einem oder an beiden Enden des Rohres liegen. Es ist aber auch möglich, das Rohr an einem anderen Punkt anzuregen. Je nach Abschluss des Rohres ergibt sich eine ausbreitende und eine stehende Welle. Die Wellenlänge der Dehnwelle auf dem Rohr muss dabei größer als die Wellenlänge im umgebenden Medium sein. Da benachbarte Maxima gegenphasig schwingen, ergibt sich eine Abstrahlcharakteristik mit Nullstellen längst des Rohres. Abbildung 4 c) zeigt den Schalldruckpegel längst eines Rohrschwingers mit 7 Maxima. Radial nimmt der Schalldruck aufgrund der Zylindersymmetrie schnell ab. Die Schalldruckmaxima sind tellerförmig längst des Wandlers angeordnet. Bei Anregung mit mehreren Elementen ist es auch möglich, durch eine Phasenverschiebung eine Wanderwelle auf dem Rohr zu erzeugen und die tellerförmigen Ebenen damit zu verschieben.

Vergleicht man die unterschiedlichen Schallfelder miteinander, so ist zu erkennen, dass die Reichweite des Nahfeldes bei einer dichten, gleichphasigen Bestückung am größten ist. Die gegenphasige Bestückung führt zu einem sehr gleichmäßigen Schallfeld mit mittlerer Reichweite. Die Ausführung des Wandlers als Verbundschall erhöht dabei den Wirkungsgrad, da keine Verlustleistung durch Biegewellen entsteht. Die Reichweite von Rohr- oder Stabschwinger ist aufgrund der Zylindersymmetrie geringer. Außerdem muss die Position eines Rohrschwingers in einer Wanne auf die Geometrie abgestimmt werden.

Die berechneten Schallfelder können durch Messungen verifiziert werden. Abbildung 9 zeigt die Messung des Schalldruckpegels eines kleinen Ultraschallgerätes mit zwei Wandlerelementen, die gleichphasig a) und gegenphasig b) angesteuert werden. Es ist gut zu erkennen, dass die Lage der Schalldruckmaxima über die Phase gesteuert werden kann.



a) Abb. 9 Messung der räumlichen Verteilung des Schalldruckpegels bei a) gleichphasiger und b) gegenphasiger Ansteuerung von 2 Elementen