

Frequenzoptimierung von piezoelektrischen Wandlern mittels Wellenparametern

R. Sobotta, Elma GmbH & Co KG, Singen

Piezoelektrische Wandler werden aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und einfachen Aufbaus eingesetzt, um Leistungsumschall zu erzeugen. Der Nachteil dieser piezoelektrischen Wandler besteht allerdings in der begrenzten Bandbreite, da es sich in der Regel um Resonatoren mit relativ hoher Güte handelt. Immer häufiger wird der Einsatz von mehreren Frequenzen gleichzeitig oder umschaltbar – z. B. bei der optimalen Anregung von Kavitationsblasen – gefordert.

Zur Optimierung von piezoelektrischen Wandlern bietet sich eine Beschreibung durch Wellengrößen an [1]. Hierzu wird der Wandler eingebettet in Wellenwiderstände betrachtet. Der mechanische Wellenwiderstand zeigt, ob eine Anpassung des Wandlers an das entsprechende Medium möglich ist, und die Wellenübertragungsfunktion beschreibt die Sperr- und Durchlaßbereiche der Leistungsübertragung über der Frequenz.

Eine piezoelektrische Keramik kann eindimensional als mechanische Leitung - beschrieben durch die mechanische Impedanz $Z = \rho \cdot c \cdot A$ (Dichte ρ , Schallgeschwindigkeit c , Fläche A) und Laufzeit $t = c/l$ (Länge l) - betrachtet werden, wenn die Querabmessungen klein zur Wellenlänge sind [2]. Die Elastizität oder Schallgeschwindigkeit des piezoelektrischen Materials wird durch die elektrische Beschaltung beeinflusst. Durch Leerlauf und Kurzschluß der elektrischen Klemmen ergeben sich Resonanz- und Antiresonanzfrequenz.

In Abbildung 1 ist oben die typische Frequenzabhängigkeit des Betrags der mechanischen Wellenimpedanz Z_{mech} einer piezoelektrischen Keramik in beliebigen Einheiten dargestellt. Der Verlauf ist durch Minima bei Vielfachen der halben Wellenlänge und Maxima bei ungeradzahigen Vielfachen der viertel Wellenlänge des piezoelektrischen Resonators geprägt. In der Abbildung ist auch der mechanische Wellenwiderstand Z_w von Wasser eingetragen. Nur in Bereichen, wo die Wellenimpedanz reell ist – zwischen Resonanz und Antiresonanz - und in der Größenordnung des Wellenwiderstands des Mediums liegt, kann Leistung ohne nennenswerte Reflexionen übertragen werden [3].

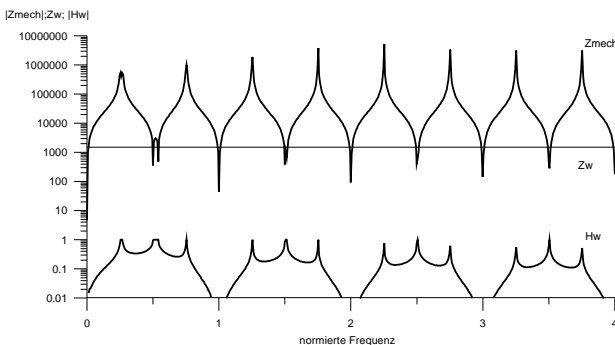


Abb. 1 Frequenzabhängigkeit des Betrags der mech. Wellenimpedanz Z_{mech} (oben) und der Wellenübertragungsfunktion H_w (unten) einer piezoelektrischen Keramik

Die Wellenübertragungsfunktion H_w in Abbildung 1 zeigt, daß bei Vielfachen der Wellenlänge keine Leistung übertragen werden kann.

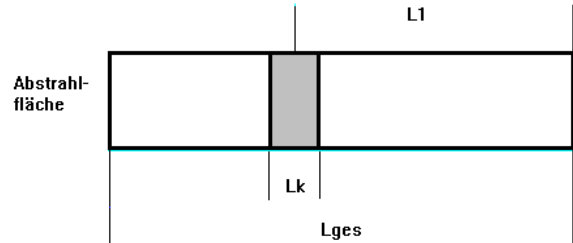


Abb. 2 Geometrie eines piezoelektrischen Stabes mit passiven Endabschnitten

Es ist auch bekannt, daß der Kopplungsfaktor einer piezoelektrischen Keramik sich erhöht, wenn die Keramik auf beiden Seiten symmetrisch passive Abschnitte erhält. Entsprechend Abbildung 2 wird daher nun von einem homogenen Stab ausgegangen. Die aktive Keramik ist symmetrisch in der Mitte des Stabes angeordnet ($L_1 = L_{\text{ges}}/2$). Die Frequenzabhängigkeit der Wellenübertragungsfunktion für unterschiedliche Verhältnisse der Keramiklänge L_k zur Gesamtlänge L_{ges} ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Maxima der Wellenübertragungsfunktion sind dunkel dargestellt, die Minima hell. Die Wellenübertragungsfunktion aus Abbildung 1 ist am unteren Rand bei $L_k/L_{\text{ges}} = 100\%$ wiederzufinden. Die Breite des Maximums der Funktion bei $\lambda/2$ ist tatsächlich abhängig von dem Verhältnis der aktiven Keramik zu der Gesamtlänge.

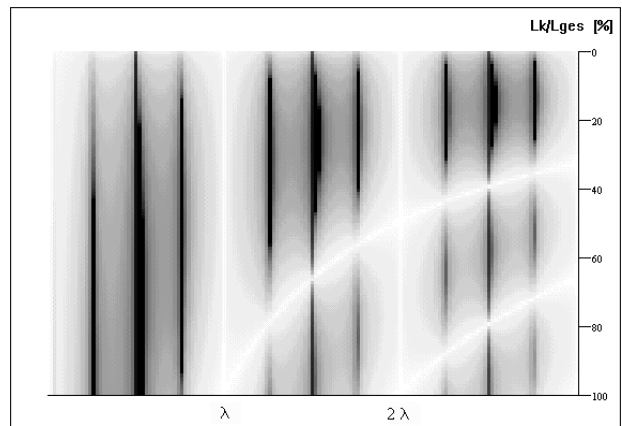


Abb. 3 Normiertes Wellenübertragungsspektrum eines piezoelektrischen Wandlers bei Variation der aktiven Keramiklänge im Vergleich zu der Gesamtlänge

Häufig wird die Keramik auch auf der Oberwelle bei $3 \cdot \lambda/2$ betrieben. In Abbildung 3 fällt auf, daß diese Oberwelle bei ca. 67 % aktiver Keramik ein Minimum aufweist und bei 27 % ein Maximum. Durch Änderung der aktiven Keramiklänge im Vergleich zu der Gesamtlänge lassen sich also die $\lambda/2$ -Frequenz und ungeradzahige Oberwellen in ihrer Bandbreite optimieren.

Bisher wurde davon ausgegangen, daß die aktive Keramik in der Mitte des Schwingers angebracht ist. Diese Anordnung sorgt dafür, daß alle Frequenzen mit einem Vielfachen der

Wellenlänge in dem Wandler nicht übertragen werden können. Wenn die aktive Keramik nun unsymmetrisch im Wandler angeordnet ist, lassen auch diese Frequenzen sich zum Teil übertragen.

In Abbildung 4 ist das Wellenübertragungsspektrum eines

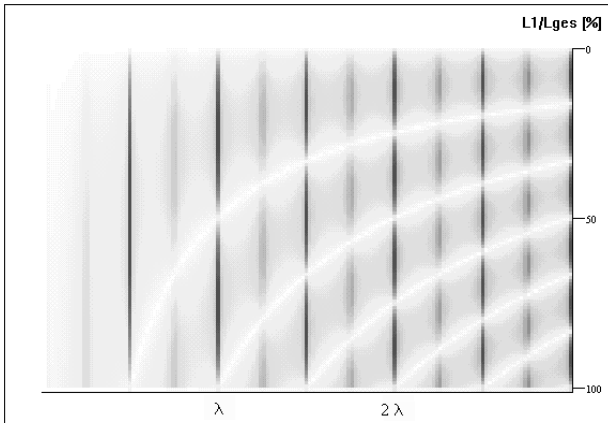


Abb. 4 Normiertes Wellenübertragungsspektrum eines piezoelektrischen Wandlers bei Variation der Position der aktiven Keramik

Wandlers dargestellt, der nur 1% der Länge als aktive Keramik enthält. Die Position der aktiven Keramik im Wandler ist als Parameter aufgetragen ($L1/L_{ges}$ entsprechend Abb. 2). Anhand dieser Abbildung kann die optimale Keramikposition bestimmt werden, wenn der Wandler mehrere Frequenzen übertragen soll.

Ein Wandler, der bei den beiden niedrigsten Resonanzen ($\lambda/2$ und λ) Leistung übertragen soll, wird also so ausgelegt, daß die Keramik entweder bei ca. 30 % der Wandlerlänge oder bei 70 % positioniert ist. Die Länge der Keramik wird nach Abbildung 5 so gewählt, daß eine optimale Bandbreite bei beiden Frequenzen erreicht wird.

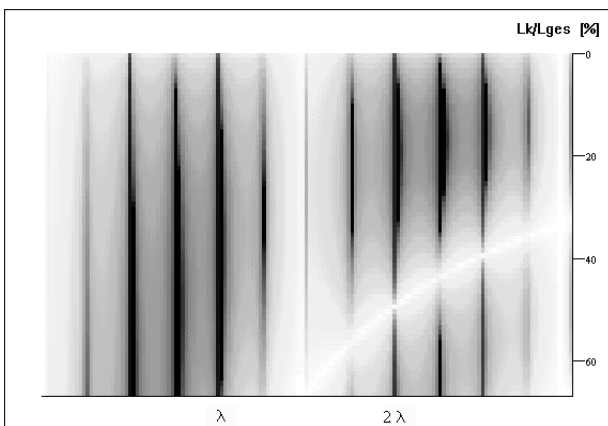


Abb. 5 Normiertes Wellenübertragungsspektrum eines bei $\lambda/2$ und λ optimierten Wandlers bei Variation der Länge der aktiven Keramik

Bisher wurde davon ausgegangen, daß der Wandler aus homogenem Material besteht. Das heißt die passiven Abschnitte müssen auch die mechanische Impedanz von Keramik aufweisen. Diese Einschränkung ist in der Regel aber nicht sinnvoll. Daher wurde das Wellenspektrum in Abhängigkeit von dem Impedanzverhältnis Z_e/Z_k berechnet. Z_e stellt dabei die mechanische Impedanz der Endabschnitte dar und Z_k die

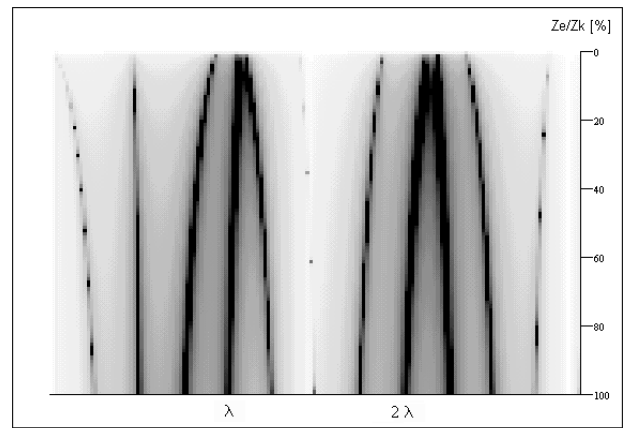


Abb. 6 Normiertes Wellenübertragungsspektrum eines bei $\lambda/2$ und λ optimierten Wandlers bei Variation der Impedanz der Endabschnitte

Impedanz der Keramik. Aus Abbildung 6 ist zu entnehmen, daß die Lage der Resonanzfrequenzen sich mit abnehmendem Impedanzverhältnis verändert. Technisch ist aber nur ein Impedanzverhältnis von ca. 35 % erreichbar, wenn die Fläche der Membran nicht nennenswert kleiner sein soll als die Keramikfläche. Die Frequenzverschiebung stellt praktisch gesehen kein Problem dar. Durch geometrische Dispersion ergibt sich grundsätzlich eine zusätzliche Verschiebung der Resonanzfrequenzen.



Abb. 7 Multifrequenzwandler für Industriegeräte

Die theoretischen Betrachtungen der Wellenwiderstände und Wellenübertragungsfunktion von piezoelektrischen Wandlern wurden praktisch eingesetzt für die Entwicklung von Multifrequenzwandlern. Diese Wandler (s. Abb. 7) werden in Industriegeräten eingesetzt. Damit ergibt sich die Möglichkeit, zwischen der Intensivreinigung bei tiefen Frequenzen und der Feinreinigung bei hohen Frequenzen (90 bzw. 130 kHz) umzuschalten.

- [1] W. P. Mason, Electromechanical Transducers and Wave Filters, Second Edition (D. Van Nostrand, 1948)
- [2] R. Hänel, A. Mues, R. Sobotta, Beschreibung von Ultraschallwandlern durch Wellengrößen, Fortschritte der Akustik - DAGA '95, DPG-GmbH, Bad Honnef 1995
- [3] A. Mues, R. Sobotta, Wellenanpassung piezoelektrischer Wandler, Fortschritte der Akustik - DAGA '97, DPG-GmbH, Bad Honnef 1997