

Optimierung piezoelektrischer Wandler für mehrere Frequenzen

R. Sobotta, Elma GmbH & Co KG, Singen

Kinetische Energie läßt sich mittels piezoelektrischer Wandler mit hohem Wirkungsgrad bei geeigneten Eigenfrequenzen des Wandlers in ein flüssiges oder pastöses Medium eintragen. Diese Wandler können – bei entsprechendem Aufbau – auch als mechanische Wellenleiter betrachtet werden.

Es wird in der Regel ein Aufbau aus passiven Endabschnitten und aktiver Keramik in der Wandlerrmitte gewählt (s. Abb. 1). Wandler mit diesem Aufbau lassen sich leicht analytisch beschreiben [1]. Von der Mitte des aktiven Elementes aus gesehen, werden die Endabschnitte entsprechend ihrer Schallgeschwindigkeit auf die Länge einer $\frac{1}{4}$ -Wellenlänge zusammen mit der aktiven Elementlänge abgestimmt. Der Wandler schwingt also auf seiner Eigenfrequenz bei einer halben Wellenlänge. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus ist es allerdings nicht möglich, den Wandler bei geradzahligem Oberwellen zu betreiben, da sich in dem aktiven Element die Zug- und Druckanteile gerade aufheben. Daher können Wandler dieser Art nur bei der Grundfrequenz und bei ungeradzahligem Harmonischen betrieben werden.



Abb. 1 Handelsüblicher Langevin-Wandler

Aus Veröffentlichungen und der Patentschrift US5748566 ist bekannt, daß z. B. durch Einsatz von Aluminiumoxyd-Scheiben ein piezoelektrischer Wandler optimiert werden kann, der auf der 3. Harmonischen betrieben werden soll. Der Frequenzabstand zwischen der Grundfrequenz und der 3. Harmonischen ist aber recht groß. Wenn zwei oder mehr Arbeitsfrequenzen in kleinerem Abstand liegen sollen, gibt es die Möglichkeit, aktive Keramik an zwei oder mehr Positionen im Wandler einzubauen. Somit wird z. B. in der Wandlerrmitte wieder die Grundfrequenz angeregt und bei $\frac{1}{4}$ der Wandlerlänge die 2-fache Frequenz. Eine weitere Ausführung dieser Art mit aktiver Keramik bei 12,5 %, 25 % und 50 % der Länge wird in der Patentschrift US4490640 beschrieben. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand an Keramiken und Kontaktblechen und die starke mechanische Kopplung zwischen den Keramiken. Eine asymmetrische Lage der Keramik wird bereits in der Patentschrift US5076854 für einen Langevin-Wandler vorausgesetzt. Die optimale Lage der aktiven Keramik wird allerdings nicht beschrieben.

Es wird nun vorgeschlagen, die Position der piezoelektrischen Keramik so zu wählen, daß mittels eines aktiven Segments mehrere Frequenzen optimal angeregt werden können. Die Keramik wird dazu räumlich an einer Position mit hoher mechanischer Spannung bei der entsprechenden Eigenfrequenz angeordnet. Hierzu wird von einem 1-dimensionalen Modell ausgegangen. Wenn die geometrische Dispersion vernachlässigt werden kann, also die Querabmessungen im Vergleich zur halben Wellenlänge klein sind, ist die Ortsabhängigkeit der mechanischen Spannung sinusförmig.

Für die mechanische Spannung $S(x, n)$ bei der n -ten Eigenfrequenz gilt:

$$S(x, n) = a \cdot \sin(\pi \cdot n \cdot x / l)$$

a : Amplitude, l : Elementlänge, x : Längenkoordinate

Es wird nun vorgeschlagen, aus dem Maximum des geometrischen Mittels des Betrags der räumlichen Abhängigkeit der mechanischen Spannungen der entsprechenden Eigenfrequenzen die optimale Position zu bestimmen.

Für die ersten beiden Eigenfrequenzen gilt:

$$H(x) := \sqrt{|S(x, 1) \cdot S(x, 2)|}$$

Die Ortsabhängigkeit des geometrischen Mittels des Betrags der mechanischen Spannung bei jeweils 2 Eigenfrequenzen ist in Abbildung 2 dargestellt.

Das Maximum der Funktion für die 1. und 2. Eigenschwingung beträgt 0.877 und liegt bei 30,4 % der Länge. Da die Funktion grundsätzlich symmetrisch ist, tritt ein zweites Maximum bei 69,6 % auf. Die Mitte des aktiven Elements sollte also bei 30,4 % oder 69,6 % der Länge positioniert werden, um optimal die erste und zweite Eigenschwingung anzuregen. Die Nullstelle der Funktionen bei der Position $x = 50$ % beweist, daß ein symmetrisch aufgebauter Wandler geradzahlige Eigenschwingungen nicht übertragen kann.

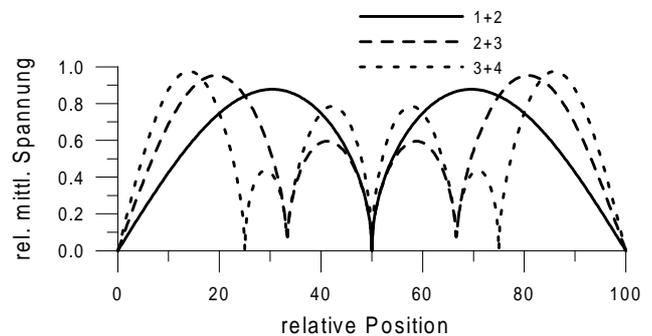


Abb. 2 Ortsabhängigkeit des geometrischen Mittels des Betrags der mechanischen Spannungen
Parameter: gewählte Eigenfrequenzen

Wenn der Frequenzabstand kleiner werden soll und die geometrischen Abmaße nicht begrenzt sind, kann der Wandler auch auf die 2. und 3. Eigenfrequenz oder sogar auf die 3. und 4. Eigenfrequenz abgestimmt werden. Die optimalen Positionen lassen sich entsprechend berechnen und sind ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt. Das aktive Element sollte in diesem Fall bei 19 % bzw. 14 % der Länge positioniert werden.

Die Berechnung eines Wandlers für die 1. und 3. Eigenfrequenz führt auf das bekannte Ergebnis, daß das aktive Element in der Mitte bei 50 % der Länge angeordnet werden sollte. Das Maximum der Funktion beträgt in diesem Fall 1. Das zeigt, daß die Anregung symmetrischer und unsymmetrischer Eigenfrequenzen gleichzeitig zu einem etwas reduzierten Kopplungsfaktor führt.

Wenn mehr als 2 Eigenfrequenzen angeregt werden sollen, wird die folgende Berechnung vorgeschlagen:

$$G(x) := \sqrt{\prod_{k=1}^m |S(x,k)|}$$

m: Anzahl der Eigenfrequenzen

Als Beispiel sind in Abbildung 3 die Funktionen für einen Wandler, der für die ersten 3, 4 bzw. 5 Eigenschwingungen berechnet wurde, dargestellt.

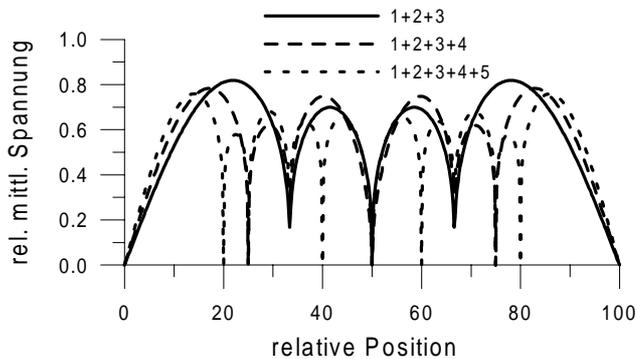


Abb. 3 Ortsabhängigkeit des geometrischen Mittels des Betrags der mechanischen Spannungen
Parameter: gewählte Eigenfrequenzen

Wenn die Position des aktiven Materials in dem eindimensionalen Modell bestimmt ist, können die passiven Abschnitte in ihrer Länge und ihrem Durchmesser auf anderes Material umgerechnet werden. Die Länge der Abschnitte wird so gewählt, daß die gleiche Laufzeit wie in den passiven Abschnitten erreicht wird. Der Durchmesser wird so gewählt, daß die mechanische Impedanz $Z = \rho \cdot c \cdot A$ (ρ : Dichte, c : Schallgeschwindigkeit A : Fläche) des gewählten Materials in der Größenordnung der mechanischen Impedanz des aktiven Materials liegt. Sollte ein größerer Impedanzsprung gewünscht oder erforderlich sein, ist die Frequenzänderung aufgrund des Impedanzsprungs zu berücksichtigen.

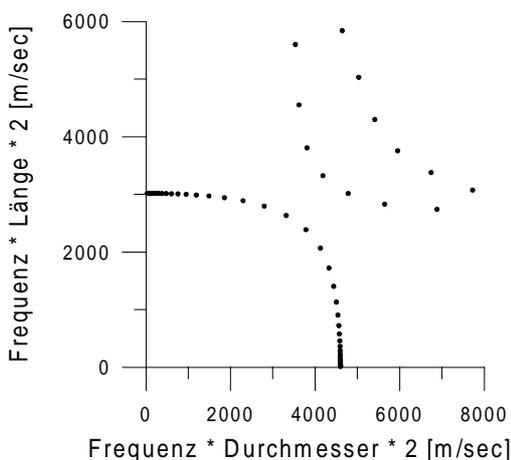


Abb. 4 Geometrieabhängigkeit der ersten 3 Eigenfrequenzen piezoelektrischer Keramik (Dispersion)

Häufig kann auch nicht davon ausgegangen werden, daß die Querabmessungen des Wandlers klein gegenüber der halben Wellenlänge sind. In diesem Fall muß die geometrische Dispersion mit berücksichtigt werden. In Abbildung 4 ist dargestellt, wie stark die Längenresonanzfrequenz durch die

Radialresonanzfrequenz bei einem Keramikstab beeinflusst wird. Dadurch verschieben sich die Eigenfrequenzen, die in der Nähe der Radialresonanzfrequenz liegen.

Messungen an Musterwandlern zeigen, daß es möglich ist, Wandler mit optimierten Eigenfrequenzen zu realisieren. Abbildung 5 zeigt den Impedanzverlauf eines optimierten Wandlers für die ersten 4 Eigenfrequenzen. Um so größer die Anzahl an optimierten Eigenfrequenzen ist, um so kleiner wird allerdings der Kopplungsfaktor der einzelnen Resonanzen.

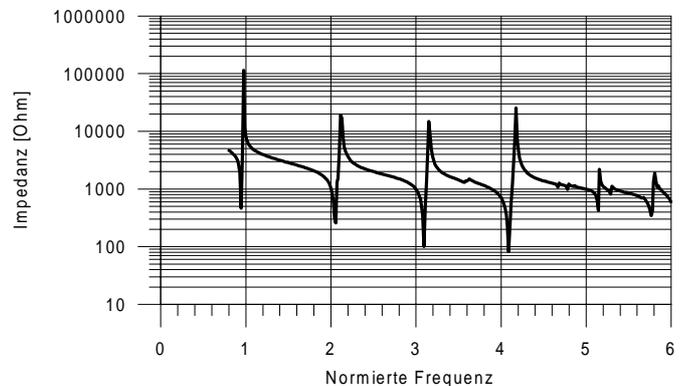


Abb. 5 Gemessene Frequenzabhängigkeit des Betrags der Impedanz eines Multifrequenzwandlers

Die Wellenanpassung an das Medium, in das die Energie abgestrahlt werden soll, wird nicht nur durch die Impedanz des entsprechenden Endstücks beeinflusst, sondern auch durch seine Länge [2]. Daher ist es vorteilhaft, das kürzere Endstück zur Abstrahlung zu verwenden, wenn ein gleichmäßiger Impedanzverlauf gewünscht ist.

Multifrequenzwandler z. B. mit den optimierten Frequenzen 25 und 45 kHz werden in industriellen Ultraschallreinigungsgeräten eingesetzt. Abbildung 6 zeigt einige Ausführungsbeispiele.



Abb. 6 Multifrequenzwandler für Industrieeräte

Literatur:

- [1] J. Koch, Piezoxide Eigenschaften und Anwendungen, Valvo ISBN 3-7785-1755-4
- [2] A. Mues, R. Sobotta, Wellenanpassung piezoelektrischer Wandler, Fortschritte der Akustik - DAGA '97, DPG-GmbH, Bad Honnef 1997