

Resonante piezoelektrische Folienwandler – eine Dimensionierung mit Netzwerkmethoden

Stephan Leschka, Günther Pfeifer

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, TU Dresden

Email: Stephan.Leschka@ias.et.tu-dresden.de; Guenther.Pfeifer@ias.et.tu-dresden.de

Einleitung

Resonante piezoelektrische Folienwandler für Ultraschallanwendungen in Luft wurden zur Erreichung eines maximalen Schalldrucks mit einem neuen Netzwerkelement optimiert. Die zugehörige Geometrie der Wandlerelektrode in Kombination mit der Dicke der PVDF-Folie ermittelt man für die gewünschte Betriebsfrequenz im Bereich um 60 kHz. Auf Grund der großen Anzahl freier Parameter und der daraus folgenden Vielzahl der notwendigen Simulationsrechnungen ist besonders die Netzwerkmethod wegen der geringen Rechenzeit zur Eingrenzung des Parameterfeldes in der Lage. Die Netzwerksimulation wird im ermittelten Optimum durch eine FE-Berechnung und durch Messungen überprüft. Die Ergebnisse werden gegenübergestellt.

Das Wandlerprinzip

Bereits ausführlich untersucht wurden halbzyylinderförmige gewölbte PVDF-Ultraschallwandler zur Abstandsmessung in der Robotertechnik und zur akustischen Objekterkennung [1]. Sie eignen sich auch zum Einsatz in parametrischen Arrays zur richtscharfen Schallabstrahlung [2]. Dort wird die PVDF-Folie durch den uniaxialen Piezoeffekt zu Dehnschwingungen angeregt, die sich wegen der aufgeprägten Halbzyylinderform in Schwingungen in Richtung des Schallfeldes transformieren. Dieser Effekt sorgt für eine gute Impedanzanpassung an das Luftschallfeld, ohne das Anpasserelement eingesetzt werden müssen.

Bei den hier untersuchten Ultraschallsendern wird der PVDF-Folie die Durchbiegungsfunktion durch eine statische Druckbelastung aufgeprägt. Der Querschnitt eines solchen PVDF-Streifenwandlers ist in Abbildung 1 dargestellt. Die untersuchten Wandler bestehen

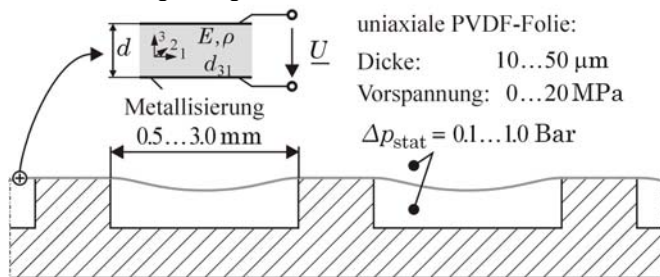


Abbildung 1: Querschnitt eines PVDF-Streifenwandlers

aus einer statisch vorgespannten PVDF-Folie, die auf eine Struktur aus parallelen und äquidistanten Stegen aufgelegt wird. Um dem uniaxialen Piezoeffekt eine Vorzugsrichtung zu geben, wird die PVDF-Folie durch einen Unterdruck leicht in die Streifenstruktur hineingesaugt. Auf Grund der verwendeten Dicke der PVDF-Folie muss die Biegesteifigkeit und die mechanische Spannung der Folie in die Simulation einbezogen werden.

Wahl des Optimierungsverfahrens

Die Vor- und Nachteile der Netzwerk- und Finite Elemente Methode ergeben eine Abgrenzung ihrer Einsatzgebiete zur Optimierung elektroakustischer Wandler. Bezüglich der Nutzung der Netzwerkmethod werden drei Problemklassen unterschieden:

1. klassische Netzwerktechnik: Alle Beziehungen zwischen den Feldgrößen können durch lineare und konstante Bauelemente dargestellt werden. Ihre komplexen bidirektionalen Wechselwirkungen sind über Wandlervierpole abgebildet.
2. modifizierte Netzwerktechnik: Ein lineares Netzwerkmodell wird zur Korrektur leichter Nichtlinearitäten eingesetzt. Da das Netzwerk selbst ein lineares System ist, konvergiert die notwendige Iterationsschleife mit Sicherheit. Die nichtlinearen Bauelemente werden während der Berechnung angepasst.
3. heuristische Netzwerkansätze: Mit deren Hilfe kann man das dynamische Verhalten von nichtlinearen Systemen um ihren gemäß 2. bestimmten Arbeitspunkt mit einer Kleinsignalanalyse berechnen.

Die klassische Netzwerktechnik ist der FEM wegen der Einfachheit und Übersichtlichkeit der Lösungsmethode überlegen. Die modifizierte Netzwerktechnik sollte man einsetzen, wenn die Problemlösung mittels FEM noch nicht angemessen erscheint. Der hier ausschließlich zur Berechnung der Wandlerresonanz angewendete heuristische Netzwerkansatz wurde nur benutzt, um eine homogene Lösung der Optimierungsaufgabe zu erreichen. Ansonsten sollten Probleme, die über die modifizierte Netzwerktechnik hinausgehen, mit Hilfe der FEM gelöst werden.

Netzwerkmodell der gespannten Platte

In Abbildung 2 ist eine gespannte Platte ohne und mit statischer Druckbelastung dargestellt. Zwei gegenüberliegende Seiten sind fest eingespannt, die dazu orthogonalen sind frei beweglich.

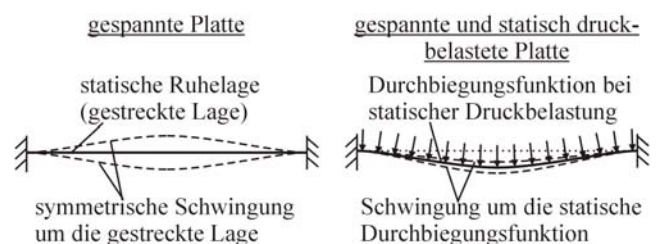


Abbildung 2: Querschnitt einer gespannten Platte ohne und mit statischer Druckbelastung

In den folgenden Abschnitten wird das Netzwerkmodell der gespannten Platte bei ihrer Schwingung um die gestreckte Lage abgeleitet. Man erhält es als Superposition der Netzwerkmodelle der Streifenmembran und des endlich langen Biegers.

Bei der Verwendung einer hohen mechanischen Vorspannung und einer geringen Dicke kann die gespannte Platte als Streifenmembran betrachtet werden. Die Wirkung der Biegesteifigkeit ist darin vernachlässigt. Das entsprechende Netzwerkmodell wurde in [3] ausführlich abgeleitet.

Der zweite Grenzfall besteht in der ausschließlichen Betrachtung der Biegesteifigkeit bei Vernachlässigung der mechanischen Spannung, der für die Betrachtung dicker und nur schwach gespannter Platten zutrifft. In [4] ist die Ableitung des entsprechenden Netzwerkmodells dargestellt.

Überlagerung von Streifenmembran und Bieger

Die beiden genannten adjunkten Grenzfälle können überlagert werden, da man Kräfte in einer mechanischen Struktur an Orten gleichen Bewegungszustandes addieren darf. Daraus resultiert das in Abbildung 3 dargestellte Netzwerkmodell der gespannten Platte.

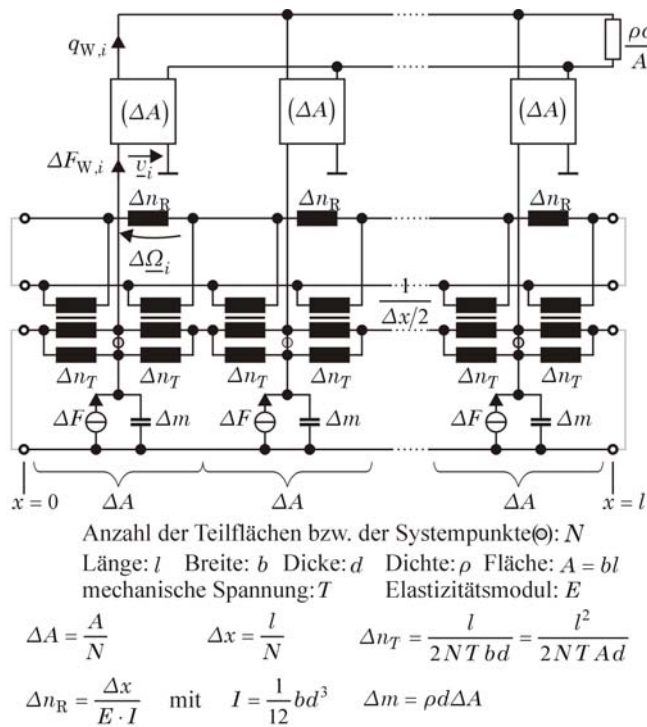


Abbildung 3: Netzwerkmodell der gespannten Platte

Die Nachgiebigkeiten n_T repräsentieren die Wirkung der mechanischen Spannung der Platte. Die Biegesteifigkeit wird durch die Verkopplung der Translations- und Rotationsbewegung und die Nachgiebigkeiten n_R in das Modell einbezogen. Das Netzwerkmodell ermöglicht die Berechnung des dynamischen Verhaltens der gespannten Platte bei der Schwingung um die gestreckte Lage bis einschließlich der ersten Resonanz. Bei der Ankopplung des Schallfeldes wurde von einem ortsunabhängigen Schalldruck vor dem Plattenquerschnitt ausgegangen.

Wandloptimierung mit Netzwerkmethoden

Die quasistatische Durchbiegungsfunktion von gespannten und druckbelasteten Platten berechnet man mit dem Netzwerk der gespannten Platte. Während einer monofrequenten Kleinsignalanalyse wird iterativ die Änderung der Folienspannung bestimmt. Die nichtlinearen Bauelemente des Netzwerkmodells passt man entsprechend der aktuellen Durchbiegungsfunktion an.

Die gespannte und statisch druckbelastete Platte schwingt in Resonanz um ihre statische Durchbiegungsfunktion. Deren dominante Wirkung auf die Schwingungsform [5] muss deshalb in das Netzwerkmodell bei der Bestimmung der Resonanzfrequenz einbezogen werden. Ein heuristischer Netzwerkansatz berücksichtigt die Formversteifung der Folie durch die Beachtung ihrer vertikalen und horizontalen Schwingungsbewegung in Resonanz.

Wichtige Wandlerparameter wurden für ein großes Parameterfeld der Eingangsgrößen (Vorspannung der Folie: [0 10 ... 30] MPa, Foliendicke: [10 12.5 ... 50] μm , Stegabstand: [0.5 0.6 ... 3.0] mm) berechnet. Die Koordination des gesamten Ablaufes der Simulationsrechnungen übernimmt ein C++-Programm. Die Vielzahl der

Ergebnisdateien wird nach Frequenzgruppen geordnet und darin nach der erreichbaren Kolbenschnelle in Resonanz sortiert.

Ergebnisse der Simulation

Die quasistatische Durchbiegungsfunktion der PVDF-Folie mit sehr dünnen Elektroden wie auch die Resonanzfrequenz wurden für eine hinreichende Anzahl von Wandlerkonfigurationen mit einer ANSYS-Referenzrechnung überprüft. Die gute Übereinstimmung der beiden unabhängigen Rechenverfahren bestätigt die Gültigkeit des Netzwerkelementes der gespannten Platte und des gewählten heuristischen Ansatzes zur Berechnung des dynamischen Verhaltens. Weiterhin konnte die Resonanzfrequenz durch einzelne Experimente bestätigt werden. Die Kolbenschnelle in Resonanz, dargestellt in Abbildung 4, erreicht ihr Maximum bei dem maximalen zur Foliendicke gehörigen Stegabstand. Dort entspricht der statische Differenzdruck bereits dem Luftdruck. Deshalb sinkt bei einer weiteren Vergrößerung des Stegabstandes die Resonanzfrequenz ab und gehört damit nicht mehr zur dargestellten Frequenzgruppe.

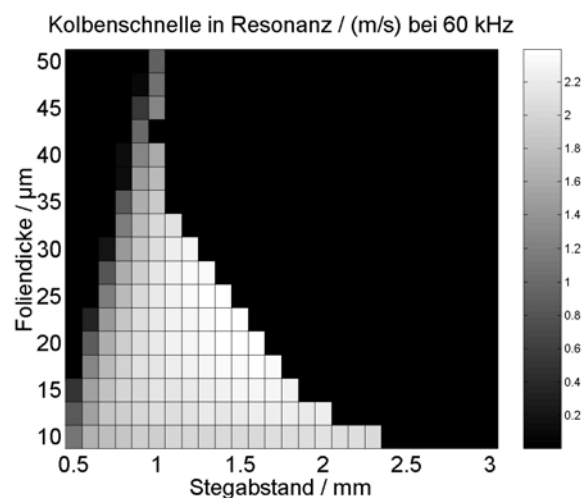


Abbildung 4: Kolbenschnelle in Resonanz bei Anwendung einer Feldstärke von 20 kV/mm

Zusammenfassung

PVDF-Ultraschallwandler wurden mit Netzwerkmethoden optimiert. Die hinreichend genaue Abbildung der PVDF-Folie durch das neue Netzwerkelement der gespannten Platte konnte durch Finite Elemente Berechnungen und Messungen bestätigt werden.

Literatur

- [1] Capineri, L.; Fiorillo, A. S.; Casotti, L.; Rocchi, S.: Piezo-Polymer transducers for ultrasonic imaging in air. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 44, no. 1, January 1997
- [2] Kroemer, N.: Untersuchungen an Luftultraschallwandlern mit gewölbter piezoelektrischer Polymerfolie. Dissertation an der TU Chemnitz 1990
- [3] Leschka, S.; Pfeifer, G.: Resonanter kapazitiver Wandler – Dimensionierung mit Netzwerkmethoden. Fortschritte der Akustik, DAGA 2001, Hamburg
- [4] Lenk, A.; Pfeifer, G.; Werthschützky, R.: Elektromechanische Systeme. Springer Verlag 2001
- [5] Wang, H.; Toda, M.: Curved PVDF airborne transducers IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 46, no. 6, November 1999