

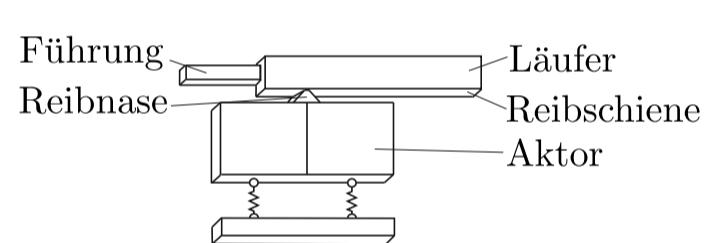
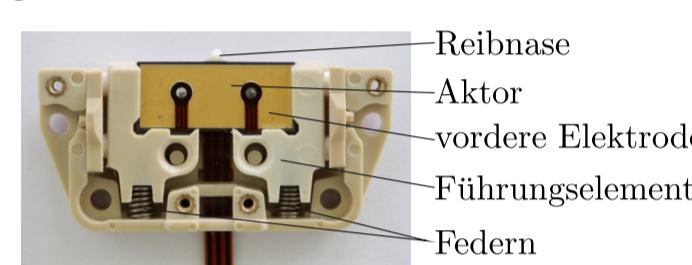
Modellierung und numerische Untersuchung eines resonant betriebenen Piezoaktors für Ultraschallmotoren

Eva Antoine

1. Motivation und Ziele

Ultraschallmotoren gehören mit ihrer nanometergenauen Auflösung, den hohen Arbeitsgeschwindigkeiten und ihrer kompakten Bauweise zu den hochpräzisen Antriebstechnologien. Sie finden unter anderem Anwendung in der Halbleiter- und Photonikfertigung, in der Messtechnik sowie in der Medizintechnik.

Die Anregefrequenz von 158 kHz, des von der Firma Physik Instrumente (PI) SE & Co. KG entwickelten Piezoaktors, der in Ultraschallmotoren eingesetzt wird, wurde bislang ausschließlich experimentell bestimmt. Da die inneren Prozesse im Aktor experimentell nicht direkt erfassbar sind, soll dieser numerisch modelliert und transient analysiert werden. Die Materialeigenschaften des Aktors haben bis zu einer Spannung von 20 MPa ein lineares Verhalten. Im Rahmen der Simulation soll überprüft werden, ob dieser Spannungswert im Betrieb überschritten wird.



Der indirekte Piezoeffekt, bei dem das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes zu mechanischen Verformungen führt, bildet die Grundlage

der Funktionsweise des piezoelektrischen Aktors.

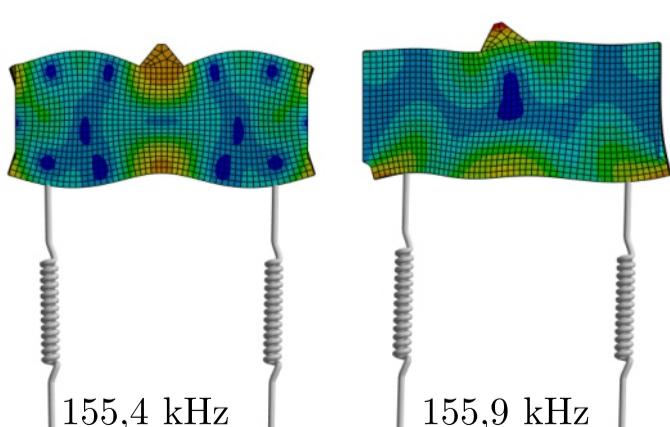
Für eine effiziente Energiewandlung werden durch eine Wechselspannung gezielt die Eigenmoden des Aktors angeregt. Die entstehenden Schwingung in Form der Reibnasentrajektorie überträgt sich mittels Reibkontakt auf die Reibschiene und wird dort in eine translatorische Bewegung umgesetzt.

Das elektrisch und mechanisch diskrete gekoppelte Gleichungssystem mit den Freiheitsgraden der Verschiebung u und elektrisches Potential Φ , bildet die Grundlage für die nachfolgenden Analysen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{Q} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2. Modale Analyse

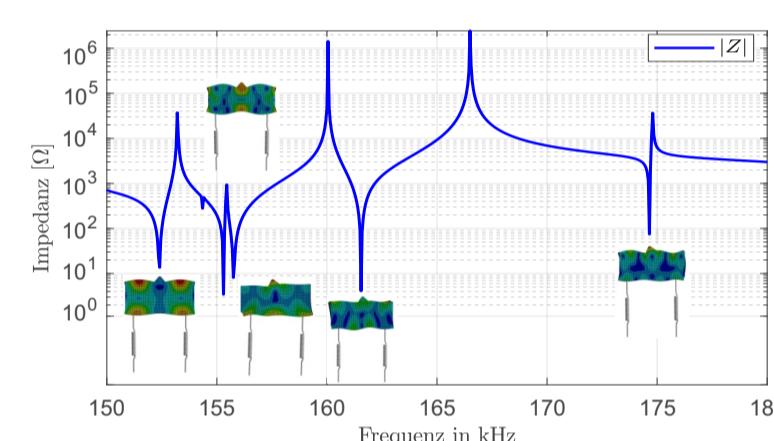
Die Lösung erfolgt zunächst durch eine modale Analyse. Ohne Berücksichtigung äußerer Lasten werden in einer linearen Eigenwertberechnung die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenmoden



bestimmt. Die Gleichung $(k - \omega^2 m) u = 0$ wird gelöst. Die Moden bei 155,4 kHz und 155,9 kHz liegen unmittelbar unterhalb der Anregefrequenz und zeigen eine ausschließlich vertikale beziehungsweise eine rein horizontale Bewegung der Reibnase.

3. Harmonische Analyse

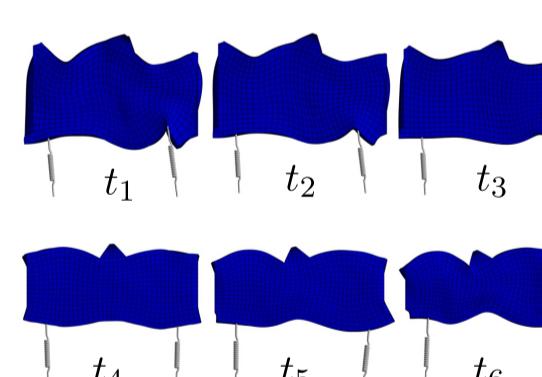
In der harmonischen Analyse wird der Aktor mit einer sinusförmigen Wechselspannung im Frequenzbereich von 100 bis 200 kHz ange regt. Aus der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom ergibt sich die komplexe elektrische Impedanz, welche den effektiven Widerstand des Aktors beschreibt. Resonanzstellen treten an lokalen Minima der Impedanz auf, während an lokalen Maxima Antiresonanzstellen liegen. Eine niedrige Impedanz ist ein Hinweis auf eine gute elektro-mechanische Kopplung.



Das links dargestellte Impedanzspektrum zeigt das Verhalten des Aktors im Bereich von 150 bis 180 kHz, die erkannten Resonanzstellen lassen sich den Eigenmoden zuordnen.

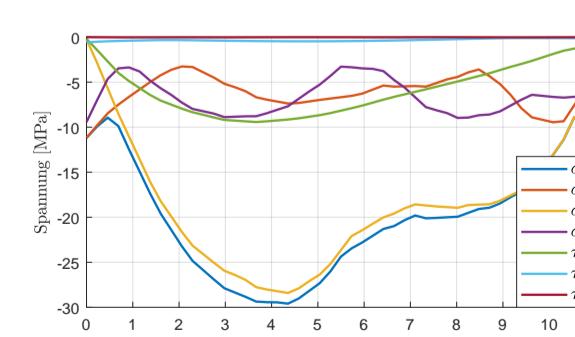
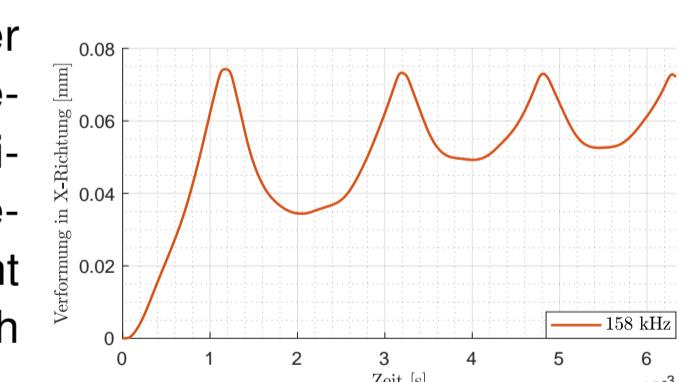
4. Transiente Analyse

In der transienten Analyse wird die Schwingung (Gl. 1) mittels direkter Zeitintegration nach dem Newmark-Verfahren berechnet.



Links ist die Verformung der Reibnase zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Oben treibt der Aktor die Reibschiene nach rechts und die Reibnase liegt an. Unten hebt sie sich ab, während sich der Aktor ohne Antrieb der Reibschiene nach links bewegt.

Die resultierende Bewegung der Reibschiene ist rechts dargestellt. Sie wird zunächst in eine Richtung angetrieben, bewegt sich anschließend leicht zurück und dann wieder nach vorne.



Die maximalen Druckspannungen von -29,6 MPa überschreiten den linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs- und Spannungs-Polarisations-Beziehungen. Das Materialverhalten des realen Aktors

kann somit eine nichtlineare Charakteristik aufweisen. Dadurch können sich die Eigenmoden verschieben und das Material schneller altern.