Optimierung piezoelektrischer Ultraschallmotoren

Autor(en): **Flückiger, Markus**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **98 (2007)**

Heft 19

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857485

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Optimierung piezoelektrischer Ultraschallmotoren

Methoden der statistischen Versuchsplanung verringern die Rechenzeit für die FEM-Optimierung

Piezoelektrische Ultraschallmotoren sind elektromagnetischen Kleinmotoren überlegen, weil ihr Wirkungsgrad bei der Miniaturisierung theoretisch konstant bleibt. Da die Technologie noch vergleichsweise jung ist, besteht jedoch ein beachtliches ungenutztes Optimierungspotenzial. Numerische Strukturanalyse mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein gängiges Mittel zur Dimensionierung von piezoelektrischen Motoren. Es besteht folglich ein Bedarf für effiziente, auf die FEM-Analyse zugeschnittene Optimierungsverfahren. Ein Ansatz, der statistische Versuchsplanung mit numerischen Optimierungsmethoden kombiniert, zeigt interessante Resultate.

Beim piezoelektrischen Ultraschallmotor teilt sich die Energieumwandlung in zwei Schritte: Elektrische Energie wird durch Anlegen eines oszillierenden elektrischen Feldes an piezoelektrische Elemente in mechanische Schwingungsenergie umgewandelt, und diese hochfrequenten Vibrationen mit kleiner Amplitude werden dann durch Reibungskontakt in kontinuierlich lineare oder rotative Bewegungen des anzutreibenden Elements übertragen [1].

Markus Flückiger

Ähnlich wie ein elektromagnetischer Antrieb bestehen auch die Motoren, deren Funktionsprinzip auf dem inversen piezoelektrischen Effekt beruht, grundsätzlich aus einem fixen Element, dem Stator, und einem beweglichen Element, dem Rotor (Bild 1).

Der Stator setzt sich im Allgemeinen aus zwei Teilen zusammen: der piezoelektrischen Keramik zur Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie (piezoelektrischer Aktuator in Bild 1) und einem metallischen Element, dem Resonator. Je nach Ausführung des Motors kann der Resonator unterschiedliche Aufgaben erfüllen, er dient jedoch hauptsächlich der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Stators. An der Schnittstelle von Stator und Rotor (Reibungsfläche) führen die Vibrationen mittels Reibungskontakt zu einer kontinuierlichen Fortbewegung des Rotors. Weil alle Prinzipien dieser Energieumwandlung grundsätzlich auf lineare und rotative Bewegungen anwendbar sind, ist hier keine Unterscheidung zwischen den beiden Motortypen angezeigt. Der Linearmotor ist dabei als Rotationsmotor mit unendlichem Durchmesser zu sehen, wobei per Konvention das anzutreibende Element ebenfalls als Rotor bezeichnet wird [2].

Die Schwierigkeit liegt nicht in der Umwandlung von elektrischer Energie in Schwingungsenergie, sondern in der Nutzung der Vibrationen für eine gleichmässige Fortbewegung. Verschiedene Motorformen sind vorgeschlagen worden, darunter auch solche, deren Stator vollständig aus piezoelektrischen Materialien gefertigt wird und somit als Ganzes aktiv ist [4]. Während seit Langem Motoren für spezifische Anwendungen entwickelt und optimiert werden, kamen vielseitig einsetzbare Motoren erst vor Kurzem zur Marktreife, und es besteht teilweise ein beachtliches ungenutztes Optimierungspotenzial. Zudem fehlen standardisierte Entwicklungs- und Optimierungsmethoden weitgehend. Durch zielgerichtetes und methodisches Vorgehen vom Entwurf eines neuen Motorkonzepts bis hin zu dessen Optimierung können namentlich Wirkungsgrad und Verschleissfestigkeit deutlich verbessert werden. Während Letztere vor allem durch geeignete Gestaltung des Kontaktmechanismus erhöht wird, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen optimaler Beschaffenheit des Resonators und dem Wirkungsgrad des Motors. Die in diesem Beitrag präsentierte Optimierungsmethode dient denn auch hauptsächlich der Optimierung der Resonatorgeometrie, ist aber grundsätzlich auf verschiedenste Zielfunktionen anwendbar. Die Rechenzeit für die Analyse und Optimierung komplexer Strukturen, gestützt auf die FEM, wird zudem erheblich verringert.

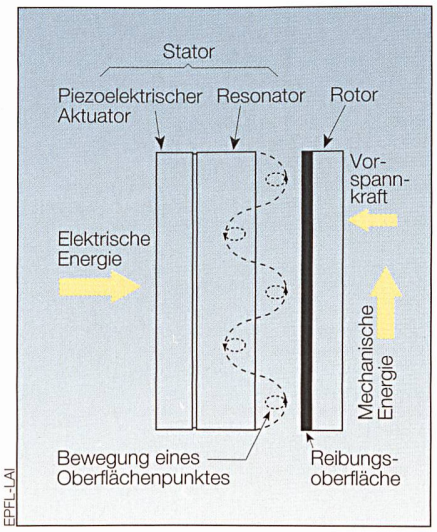

Bild 1 Funktionsprinzip eines piezoelektrischen Ultraschallmotors [3].

Optimierungsmethode

Mittels einer Sensitivitätsanalyse werden signifikante Systemvariablen eines numerischen Modells bestimmt, welche dann für die Optimierung einer Zielfunktion mittels der FEM verwendet werden.

Finite-Elemente-Methode (FEM)

Numerische Simulationen mittels der FEM sind ein gängiges Mittel zur Dimensionierung von piezoelektrischen Motoren. Sie ermöglichen die Berechnung der Eigenschaften von komplexen Strukturen mit relativ geringem Aufwand, wo präzise analytische Modelle schwierig oder gar unmöglich zu erlangen sind. Das Ziel der numerischen Modellierung ist die Berechnung von Eigenfrequenzen und entsprechenden Ei-

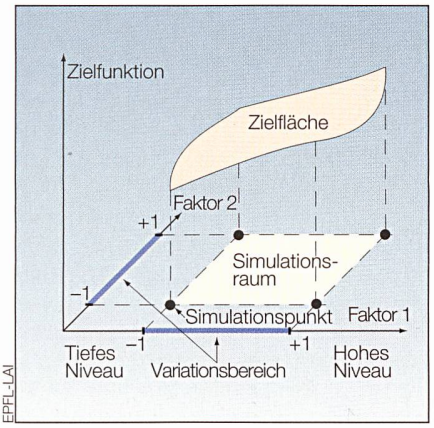

Bild 2 Simulationsplanung.

genformen, die Frequenzanalyse sowie die transiente Analyse. Die Grundgleichungen für die Motorbewegungen können wie folgt ausgedrückt werden:

$$[M]\cdot\frac{\delta^2\{u\}}{\delta^2 t}+[C]\cdot\frac{\delta\{u\}}{\delta t}+[K_1]\{u\}+[K_2]\{\Phi\} = \{F\} \quad (1)$$

$$[K_2]^T\{u\}+[K_3]\{\Phi\} = [Q] \quad (2)$$

Dabei ist u der Vektor der Knotenverschiebung, Φ der Vektor des (elektrischen) Knotenpotenzials, [M] die Massenmatrix, [C] die Dämpfungsmatrix, $[K_1]$ die Steifigkeitsmatrix, F der Vektor der mechanischen Knotenkräfte, $[K_2]$ die piezoelektrische Matrix, $[K_3]$ die dielektrische Matrix und Q der Vektor der elektrischen Knotenladung. Die Gleichungen 1 und 2 können mit der FEM gelöst werden [5].

Voroptimierung

Die hier angewendete Sensitivitätsanalyse bedient sich der Methoden der statistischen Versuchsplanung (Bild 2).

Diese stützt sich im Wesentlichen auf zwei Konzepte: jenes des Simulationsraums und jenes der mathematischen Modellierung der untersuchten Grössen. Beim simulierten mechatronischen System hängt die Zielgrösse von Systemvariabeln ab, den Faktoren. Jeder Faktor a_i kann durch eine bemasste Achse dargestellt werden, wobei die Werte, die einem Faktor für die Simulation zugeordnet werden, als Niveau bezeichnet werden. Der Variationsbereich eines Faktors ist nach unten und oben durch sein tiefes beziehungsweise hohes Niveau begrenzt. Jeder weitere Faktor wird entsprechend dargestellt. Der bei k Faktoren gebildete k-dimensionale euklidische Raum wird als Simulationsraum bezeichnet. Die Niveaus x_i sind die Koordinaten eines Simulationspunktes im Simulationsraum. Wenn nun jedem Simulationspunkt ein Zielpunkt y zugeordnet wird, erhält man die Zielfläche. Das Konzept der mathematischen Modellierung besteht darin, die Zielfläche mithilfe einer vereinfachten Taylorreihe als Funktion der Faktoren auszudrücken (Formel 3).

$$y(\bar{x}) = a_0+\sum_{i=1}^{N} a_i\cdot x_i+\sum_{i\neq j}^{N} a_{ij}\cdot x_i\cdot x_j + \ldots$$
$$\sum_{i\neq j\neq k}^{N} a_{ijk}\cdot x_i\cdot x_j\cdot x_k+a_{i\ldots N}\cdot x_i\cdots x_N \quad (3)$$

Folglich berechnen sich die Koeffizienten a_0, a_i, a_{ij}, …, $a_{i\ldots N}$ anhand der Simulationsresultate (siehe Kasten) [6]. Die Sensitivitätsanalyse erlaubt eine Reduktion der für die nachfolgende Optimierung benötigten Simulationen, indem wenig relevante Systemvariablen ausgeschlossen werden. Zudem kann der Variationsbereich der signifikanten Systemvariablen eingeschränkt werden, was zu einer weiteren Reduktion der Rechenzeit führt.

Die Simulationsplanung, also die Anwendung eines Versuchsplans für die Simulation, läuft nach folgenden Schritten ab:

- Wahl der Systemvariabeln,
- Auswahl von numerischen Werten für die Systemvariabeln gemäss des Simulationsplans,
- Simulation,
- Speichern der Simulationsdaten für die spätere Auswertung,
- Bestimmen der signifikanten Faktoren.

Diese Schritte werden mit den Programmen Matlab[1)] und Ansys[2)] ausgeführt (Bild 3). Dabei werden zuerst mit Matlab die Simulationsdateien erstellt, indem die Systemvariabeln dem Simulationsplan folgend variiert werden. Sobald diese Dateien erstellt sind, werden sie als Referenzdatei verwendet, welche N-mal (siehe Gleichung 3) mit der FEM-Software Ansys im Batch-Mode gestartet werden. Am Ende jeder Simulation erstellt Ansys eine Resultatdatei, die von Matlab bearbeitet wird, um die Resultate in einem Vektor zu speichern. Dieser Zielvektor wird dann ausgewertet, um die signifikanten Faktoren zu bestimmen.

Auf finite Elemente basierte Optimierung

Für die eigentliche Optimierung der Resonatorgeometrie werden von Ansys bereitgestellte numerische Optimierungsalgorithmen angewendet [7]. In der vorliegenden Arbeit wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet, eine Lösungsstrategie erster Ordnung auf der Basis des Gauss-Newton-Verfahrens. Alle Berechnungen und Analysen wurden mit dem Medium Luft ausgeführt, wobei andere Medien berücksichtigt werden könnten, ohne dass die Voroptimierungs- oder

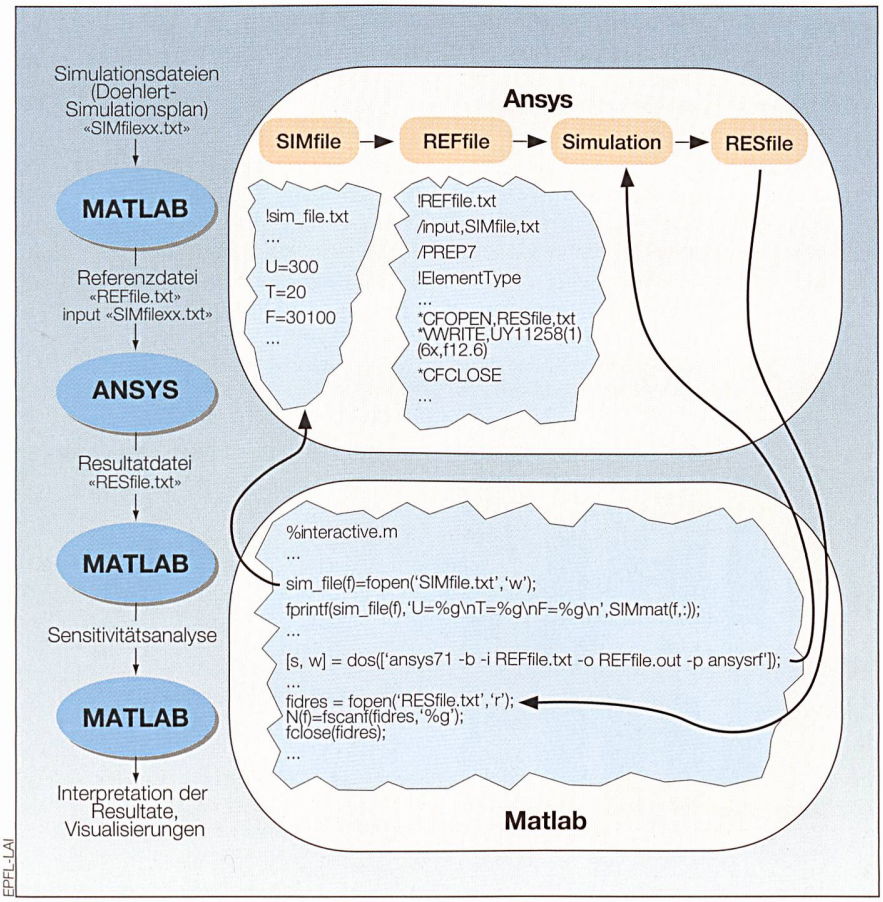

Bild 3 Optimierungsstufen.

articles spécialisés

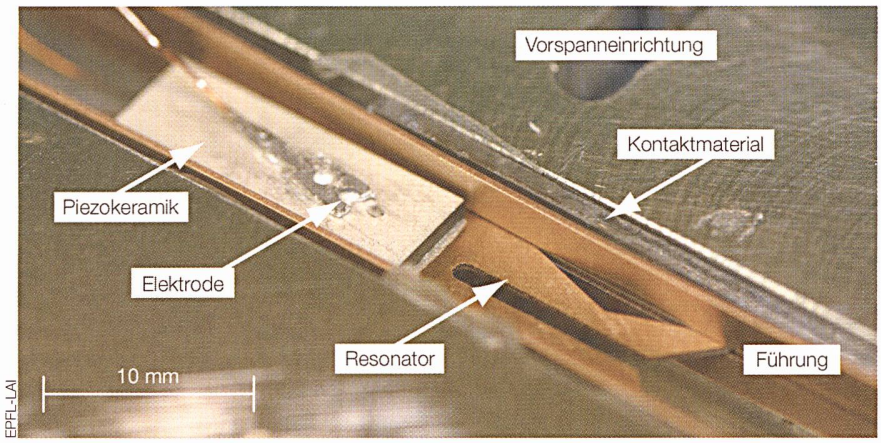

Bild 4 Linearer Piezomotor: Bauteile des Ausführungsbeispiels.

Optimierungsmethode angepasst werden müsste.

Ausführungsbeispiel

Zur Validierung der beschriebenen Methode wurden funktionale Modelle eines linearen Ultraschallmotors gefertigt. Die Gegenüberstellung während des Entwicklungsprozesses ermöglichte die kontinuierliche Verbesserung des FEM-Modells. Für jede Optimierungsstufe zeigt das endgültige numerische Modell in einem akzeptablen Bereich liegende Abweichungen vom funktionalen Modell. Dieses dient somit auch zur Validierung der vorgestellten Optimierungsmethode.

Der Rotor des entwickelten piezoelektrischen Linearmotors besteht aus zwei Piezokeramikplatten, die auf einen aus einer Kupferlegierung[3)] gefertigten Resonator geklebt sind.[4)] Bild 4 zeigt den in die Führung eingespannten Rotor. Der Resonator wird gleichzeitig zwischen zwei Quarzglasoberflächen vorgespannt und linear geführt. Die Piezokeramikplatten sind so angeordnet, dass das positive Potenzial aussen zu liegen kommt und das negative in Kontakt mit dem Resonator tritt. Diese Konfiguration ermöglicht es, mit einem einzigen sinusförmigen Signal zwei Eigenmodi des Resonators anzuregen, welche bei 84 kHz und 69 kHz liegen. Die bei diesen Resonanzfrequenzen erreichten Verformungen des Resonators führen zu einer Stoss- bzw. Ziehbewegung, wie dies in Bild 5 ersichtlich ist. Während der ersten Phase des Deformationszyklus biegen sich die Spitzen des Resonators zum Kontakt hin. Durch den Reibungskontakt zwischen Resonatoroberfläche und Kontaktmaterial wird eine Kraft erzeugt, welche den Rotor in linearer Richtung fortbewegt. Wenn sich dann die Resonatorspitzen während der zweiten Phase des Deformationszyklus vom Kontakt wegbiegen, geht der Reibungskontakt verloren, und der Rotor bewegt sich aufgrund der Trägheit weiter. Die periodische Wiederholung dieser Deformationszyklen ergibt eine kontinuierliche Linearbewegung in die gewünschte Richtung. Die Wahl einer geeigneten Resonatorgeometrie ist die erste Stufe des Optimierungsprozesses. Geradlinige Formen zeigten sowohl in der Simulation wie auch im Versuch an Modellen bessere Eigenschaften als abgerundete Formen. Hauptsächlich diese Erkenntnis führte zu der in Bild 6a als «jag=2, opt=4» gekennzeichneten Resonatorgeometrie. Diese wurde demnach für die Voroptimierung ausgewählt. Die Resultate der Voroptimierungsstufe werden dann für die dritte und letzte Stufe, die FEM-Optimierung, verwendet.

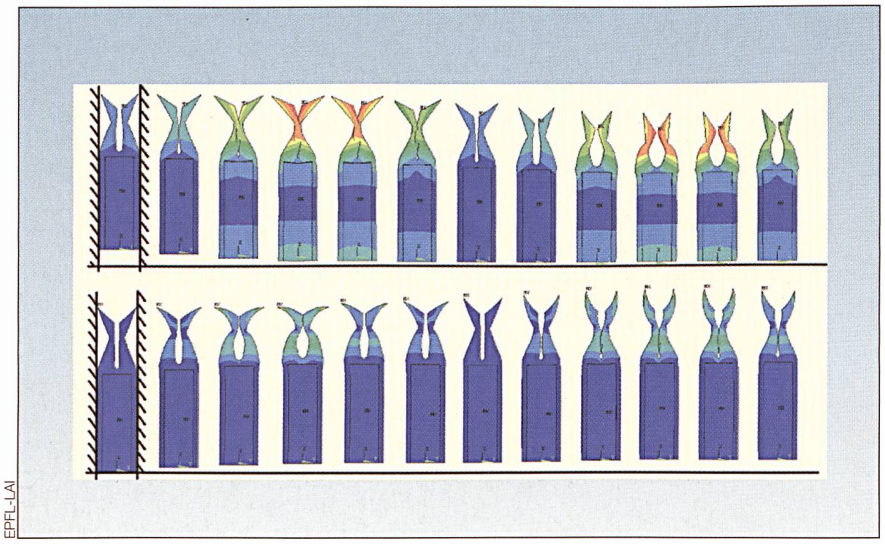

Bild 5 Eigenmodi des Resonators für 84 kHz und 69 kHz.

Parametrisierung zwecks Optimierung

Die Geschwindigkeit des Motors soll maximiert werden. Die Zielfunktion des Optimierungsprozesses ist die Deformationsamplitude des Resonators, der mit vorgegebenen piezoelektrischen Elementen angeregt wird. Die Geschwindigkeit wird folglich als Funktion der Auslenkung des

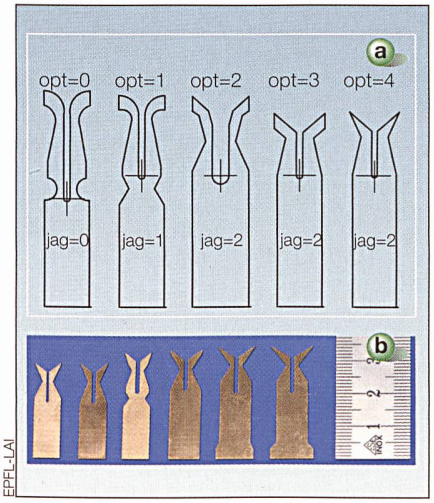

Bild 6 Resonatorgeometrie.
Bild 6a: Entwicklung der Resonatorgeometrie.
Bild 6b: Verschiedene Ausführungen in Berylliumkupfer.

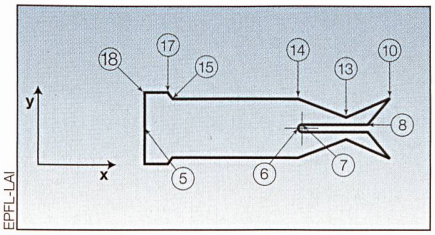

Bild 7 Definition der Resonatorgeometrie.

a_1: Kontrolle	a_2: Spannung	a_3: res kx7
a_4: res ky7	a_5: res kx8	a_6: res ky8
a_7: res kx10	a_8: res ky10	a_9: res kx13
a_{10}: res ky13	a_{11}: res kx14	a_{12}: res kx15
a_{13}: res kx17	a_{14}: res ky17	a_{15}: res kx6.

Haupteffekte und entsprechende Systemvariabeln: Die Variabeln «res kxi» und «res kyi» stehen für die x-Position beziehungsweise die y-Position der Keypoints, wobei i der Nummerierung in der Zeichnung entspricht.

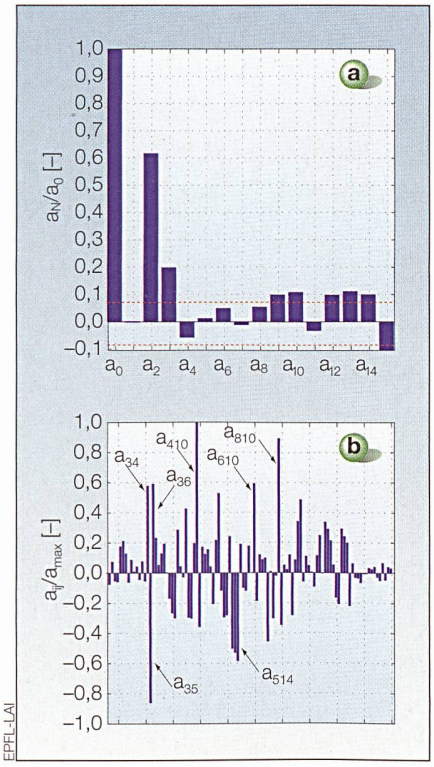

Bild 8 Resultate der Sensitivitätsanalyse: quadratisches Modell mit Wechselwirkungen.
Bild 8a: Haupteffekte (Faktoren a_i).
Bild 8b: Nebeneffekte (Faktoren a_{ij} bis $a_{i...N}$).

Resonators betrachtet. Dies ist insofern gerechtfertigt, als die Anregefrequenz während des Optimierungsprozesses konstant bleibt und somit ein grösserer Schritt automatisch eine höhere Geschwindigkeit zur Folge hat. In Bild 7 sind die wichtigsten Faktoren den für die Voroptimierung ausgewählten Systemvariabeln zugeordnet. Die freien Systemvariabeln sind die Amplitude der sinusoidalen Anregespannung und die Geometrie des Resonators, wobei die Grösse des Resonators implizit durch die fixierte Grösse der Piezokeramik beschränkt wird. In Ansys wurde das numerische Modell des Resonators mittels sogenannter Keypoints definiert (Bild 7).

Voroptimierung des Ausführungsbeispiels

Bild 8a zeigt die Haupt- und Nebeneffekte dieser Systemvariabeln. Es sind die Koeffizienten der Taylorreihe in Gleichung 3, wobei die Werte mit dem Mittelwert a_0 normalisiert sind. Der Faktor a_0 entspricht dem Zielwert, wenn alle Faktoren unverändert bleiben. Die Faktoren a_1 bis a_{15} zeigen den direkten Einfluss der Systemvariabeln auf die Zielfunktion. Positive Werte bedeuten eine Steigerung der Zielfunktion, wenn das Niveau des entsprechenden Faktors angehoben wird, negative Werte eine Verminderung.

Die Kontrollvariabel (Faktor a_1) hat den Wert null. Die Sensitivitätsanalyse wurde also korrekt durchgeführt, und die Aussagen sind statistisch signifikant. Die Anregespannung (Faktor a_2) hat den grössten Einfluss auf die Zielfunktion. Dieses Resultat ist plausibel, denn je höher die Spannung ist, desto stärker dehnt sich die Piezokeramik aus und desto grösser ist die Deformation des Resonators. Für die Faktoren, welche die Resonatorgeometrie beschreiben, wurde ein Schwellenwert bei 8% definiert (Bild 8a). Die Faktoren a_3, a_9, a_{10}, a_{12}, a_{13}, a_{14} und a_{15} werden für die FEM-Optimierung weiterverwendet, die anderen Faktoren fallen weg. Diese Selektion der Faktoren kann je nach Art des Ausführungsbeispiels und der Zielfunktion auch auf anderen Kriterien beruhen. Zudem müssen dabei gewisse Vorsichtsregeln respektiert werden, wie das folgende Beispiel illustriert. Bild 8b zeigt die restlichen Faktoren des quadratischen Modells mit Wechselwirkungen erster Ordnung. Es ist interessant, die Faktoren mit den höchsten Werten zu betrachten. Die Systemvariable res ky13 (Faktor a_{10}) interagiert stark mit mehreren anderen (Faktoren a_{410}, a_{610}, a_{810}). Dies ist ihrer Bedeutung wegen plausibel, da sie die Stärke der Resonatorenden definiert. Wenn res ky13 etwa gleichzeitig mit res ky7 variiert, werden die Resonatorspitzen sehr fein. Hier ist Vorsicht geboten, denn obwohl der Resonator so viel leichter schwingen kann, wird er der Vorspannungskraft nicht widerstehen können, und der entsprechende Motor wäre nicht funktionstüchtig.

FEM-Optimierung des Ausführungsbeispiels

Während der FEM-Optimierung sind diese Keypoints die einzigen freien Systemvariabeln, die zudem in impliziter Weise durch die Geometrie der Piezokeramik beschränkt sind. Bild 9 zeigt die Steigerung der Zielfunktion «Deformationsamplitude der Resonatorspitze» sowie die entsprechenden Resonatorgeometrien während der einzelnen Schritte des Optimierungsprozesses. Die Vibrationsamplitude der Resonatorspitze wird durch die Optimierung vervielfacht.

Validierung der Optimierungsmethode

Die Vibrationen des Resonators wurden mit einem mikroskopischen Interferometer[5] gemessen und mit den Simulationen verglichen (Bild 10). Die Messresultate am vorgespannten Rotor (Bild 10b) ergeben qualitativ das gleiche Verhalten wie jene am frei schwingenden Rotor (Bild 10a). Dies zeigt, dass die Simulation des frei schwingenden Resonators ohne Implementierung der Kontaktphänomene gültige Aussagen über das Verhalten des Motors zulässt. Zudem

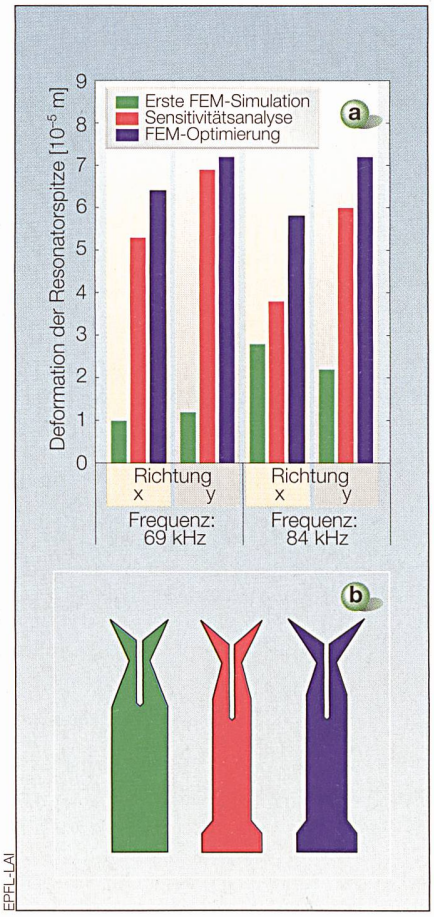

Bild 9 Resultate der Optimierung.
Steigerung der Zielfunktion «Deformationsamplitude der Resonatorspitze» (Bild 9a) und die entsprechenden Resonatorgeometrien (Bild 9b).

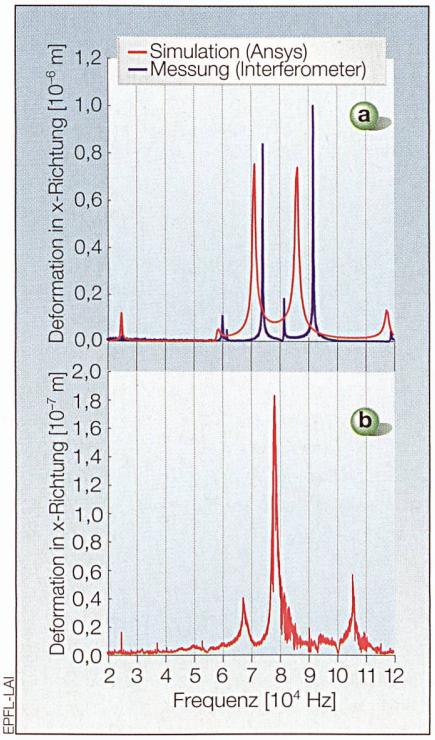

Bild 10 Deformationsamplitude an den Resonatorspitzen.
Bild 10a: Frei schwingend für 1,5 V
Bild 10a: Vorgespannt für 21,5 V

articles spécialisés

Allgemeine mathematische Formulierung der in der Voroptimierungsphase verwendeten Sensitivitätsanalyse

Hier wird die Response-Surface-Versuchsplanung nach Doehlert [8] verwendet, da es diese Methode erlaubt, die Anzahl der Simulationen relativ gering zu halten. Die Gleichung der Response-Surface lautet:

$$y(\bar{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^{N} a_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^{N} a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \ldots + \sum_{i \neq j \neq K}^{N} a_{ijk} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k + a_{i \ldots N} \cdot x_i \cdots x_N \qquad (4)$$

Mit k Systemvariabeln müssen n = k(k + 1) + 1 Simulationen ausgeführt werden. Die Simulationsmatrix S hat die Elemente x_{ij}. Die x_{ij} sind die Simulationswerte x_j der Simulation i:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \qquad (5)$$

Die Modellmatrix ist definiert als

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{11} \cdot x_{11} & x_{11} \cdot x_{12} & \cdots & x_{12} \cdot x_{12} \cdot x_{12} & \cdots \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{21} \cdot x_{21} & x_{21} \cdot x_{22} & \cdots & x_{22} \cdot x_{22} \cdot x_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{n1} \cdot x_{n1} & x_{n1} \cdot x_{n2} & \cdots & x_{n2} \cdot x_{n2} \cdot x_{n2} & \cdots \end{bmatrix} \qquad (6)$$

Mit dem Koeffizientenvektor

$$A = [a_0\ a_1\ a_2 \ldots a_{11}\ a_{12} \ldots a_{111} \ldots]^T \qquad (7)$$

lässt sich die Zielfunktion wie folgt ausdrücken:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{11} \cdot x_{11} & x_{11} \cdot x_{12} & \cdots & x_{11} \cdot x_{11} \cdot x_{11} & \cdots \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{21} \cdot x_{21} & x_{21} \cdot x_{22} & \cdots & x_{21} \cdot x_{21} \cdot x_{21} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{n1} \cdot x_{n1} & x_{n1} \cdot x_{n2} & \cdots & x_{n1} \cdot x_{n1} \cdot x_{n1} & \cdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{111} \\ \vdots \end{bmatrix} = \mathbf{X} \cdot A \qquad (8)$$

Mit dem aus den Simulationen hervorgehenden Zielvektor Y berechnen sich dann die Koeffizienten:

$$A = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y} \qquad (9)$$

bestätigen die Messresultate am frei schwingenden Resonator die Ergebnisse der FEM-Simulationen, die bereits nach der Voroptimierung eine Steigerung der Deformationsamplitude zeigen. Die FEM-Optimierung führt dann zu einer weiteren Steigerung der Zielfunktion bei verringerter Anregespannung. Dabei ergab das Ansys-Werkzeug, das sich der Optimierungsmethode erster Ordnung bedient, die besten Ergebnisse. Die etwas längere Rechenzeit dieser Methode im Vergleich zu anderen in Ansys implementierten Werkzeugen ist dank der durch die Voroptimierung erreichten Vereinfachung des Optimierungsproblems tragbar. Insgesamt konnte die Deformationsamplitude bei halbierter Anregespannung (50 V zu 21,5 V) um das Sechs- bis Siebenfache gesteigert werden (von gut 1 µm auf über 7 µm für die tiefere Resonanzfrequenz von 69 kHz).

Zusammenfassung und Ausblick

Statistische Versuchsplanung, angewendet als Vorstufe zur FEM-Optimierung, eignet sich gut, um die Deformationsamplitude des Resonators eines Ultraschallmotors zu maximieren. Die kombinierten Methoden ergänzen sich dabei ideal. Die Versuchsplanung vereinfacht das Optimierungsproblem, indem die Zahl der Simulationsvariablen verringert sowie deren Variationsbereich eingeschränkt wird. Die Gegenüberstellung von Simulationsresultaten mit funktionalen Modellen eines Anwendungsbeispiels für jede Optimierungsstufe validiert die beschriebene Entwurfs- und Optimierungsmethode für die ausgewählte Zielfunktion. Zukünftige Weiterentwicklungen der FEM-Modelle müssen allerdings das Kontaktphänomen zwischen Stator und Rotor mit einbeziehen, um verlässliche Aussagen über Geschwindigkeit und Kraft zu erhalten. Piezoelektrische Motoren und ihre Steuerungselektronik wurden bisher meist auf spezifische Anwendungen wie Uhrwerke oder Kameraobjektive hin optimiert

und sind oft nicht greifbar. Frei auf dem Markt erhältliche Produkte (OEM-Produkte) hingegen sind meist nicht effizienzoptimiert. Der Motor und die Steuerungselektronik müssen als System betrachtet werden, um dessen Wirkungsgrad und die Verschleissfestigkeit wirkungsvoll erhöhen zu können.

Referenzen

[1] A. M. Flynn: Piezoelectric Ultrasonic Micromotors. Dissertation, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1995.

[2] C. Péclat: Conception et réalisation d'un micromoteur piézoélectrique. Dissertation, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 1995.

[3] J. M. Fernandez: Modeling and optimization of ultrasonic linear motors. Dissertation, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2006.

[4] K. Spanner: Survey of the various operating principles of ultrasonic piezomotors. Actuator, 2006.

[5] R. Lerch: Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 37, no. 3, pp. 233–247, 1990.

[6] J. Goupy: Les plans d'expériences. Revue Modulad, vol. 34, pp. 74–116, Juli 2006.

[7] J. M. Fernandez, Y. Perriard: Sensitivity analysis and optimization of a standing wave ultrasonic linear motor. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 53, no. 7, pp. 1352–1361, 2006.

[8] G. E. P. Box, N. R. Draper: Empirical model-building and response surfaces. John Wiley, 1987.

Angaben zum Autor

El.-Ing. *Markus Flückiger* studierte Mikrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (EPFL) in Lausanne. Seit 2005 arbeitet er dort im Integrated-Actuators-Laboratory (LAI) unter Leitung von Prof. Yves Perriard. Er beschäftigt sich mit der Optimierung und Miniaturisierung piezoelektrischer Motoren.

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), STI-IPR-LAI, 1015 Lausanne, markus.flueckiger@epfl.ch

Résumé

Optimisation des moteurs piézoélectriques à ultrasons

Des méthodes de planification expérimentale statistique réduisent le temps de calcul pour l'optimisation par la méthode des éléments finis. Les moteurs piézoélectriques à ultrasons sont supérieurs aux petits moteurs électromagnétiques étant donné que leur rendement reste théoriquement constant malgré la miniaturisation. Cette technologie étant relativement nouvelle, il existe encore un potentiel d'optimisation considérable. L'analyse numérique structurelle à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF) est un moyen courant de dimensionnement des moteurs piézoélectriques. Elle requiert donc des procédés d'optimisation efficaces et à la mesure de l'analyse MEF. Une approche combinant la planification expérimentale statistique et les méthodes numériques d'optimisation donne des résultats intéressants.

[1] Matlab ist eine kommerzielle, plattformunabhängige Software zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse. Sie ist speziell auch für Berechnungen mit Matrizen ausgelegt, woher sich auch der Name ableitet: MATrix LABoratory. www.mathworks.com.

[2] Ansys ist eine Finite-Elemente-Software, welche zur Lösung von nicht linearen Problemen in Bereichen wie beispielsweise Fluid- und Thermodynamik, Piezoelektrizität oder Elektromagnetismus verwendet wird. www.ansys.com.

[3] Berylliumkupfer CuBe 2 25 1/4 H.

[4] Mitwirkende EPFL-Mitarbeitende: Für das Laserschneiden der Resonatoren war Claude Amendola (EPFL-ATPR) verantwortlich. Jean-Marc Breguet und Fabian Kägi (EPFL-LSRO2) stellten ihre Werkstatt sowie Fachwissen zum Kleben der Piezokeramik zur Verfügung.

[5] Polytec MSA-400.