

Modellbasierte Entwicklung piezoelektrischer Trägheitsmotoren

Matthias Hunstig, Tobias Hemsel

Universität Paderborn, Fakultät für Maschinenbau

Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik

Fürstenallee 11, 33102 Paderborn

Tel. 05251 / 60 62 75, Fax 05251 / 60 62 78

matthias.hunstig@uni-paderborn.de

Zusammenfassung

Die Entwicklung piezoelektrischer Trägheitsmotoren basiert derzeit auf Erfahrungswissen und Prototypenbau. Es existiert kein allgemeines Modell und keine Methodik für die systematische Entwicklung dieser Motoren. In diesem Beitrag stellen wir einen Ansatz zur Entwicklung einer solchen Methodik und den von uns aufgebauten Versuchsmotor vor. Der Motor ist modular aufgebaut; er besteht im Wesentlichen aus einer piezoelektrischen Antriebseinheit, einem Antriebsstab und dem zu bewegenden Schlitten. Eine wesentliche Aufgabe bei der modellbasierten Entwicklung von Trägheitsmotoren ist die hinreichende Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Antriebseinheit. Um ein geeignetes Modell zu finden, bzw. um nachzuweisen, dass einfache parametrische Modelle genügen, wird die Antriebseinheit des Motors detailliert untersucht. Es zeigt sich, dass der derzeitige Aufbau eine Reihe von Nachteilen aufweist, die durch eine teilweise Neukonstruktion der Antriebseinheit beseitigt oder zumindest entschärft werden können.

Schlüsselwörter

Piezoelektrischer Trägheitsmotor, Stick-Slip-Motor, Modellbasierte Entwicklung, Modellierung, Finite-Elemente-Analyse

1 Motivation

Piezoelektrische Trägheitsmotoren (PTMen), auch als „Stick-Slip-Motoren“ oder „(Smooth) Impact Drives“ bekannt, sind eine Klasse piezoelektrischer Motoren. Die Problematik des geringen Hubs piezoelektrischer Aktoren wird in diesen Motoren durch die Akkumulation einer Vielzahl kleiner Schritte gelöst, durch die ein prinzipiell unbegrenzter Hub erreicht wird. Bild 1 verdeutlicht die Arbeitsweise dieser Motoren. Trägheitsmotoren existieren in einer Vielzahl verschiedener Bau-

formen und können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden: Den Typ „feststehender Aktor“ und den Typ „mitbewegter Aktor“. In der Fachliteratur sind diese Typen auch als „stick-slip drive“ bzw. „impact drive“ bekannt [Zes97, S.36], „stick-slip drive“ wird jedoch gleichzeitig häufig als Oberbegriff für sämtliche PTMen verwendet.

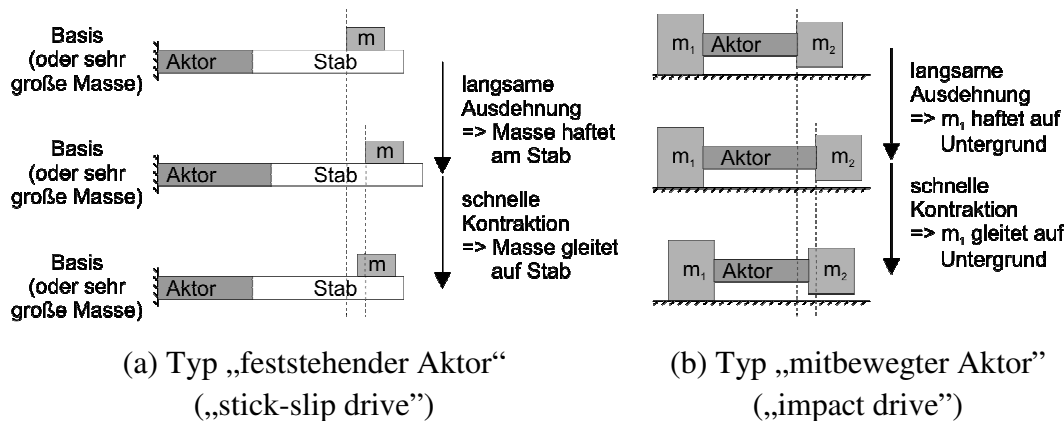


Bild 1: Funktionsprinzipien piezoelektrischer Trägheitsmotoren

Eine weitere Klassifizierung der Motoren kann anhand der erzeugten Bewegung – translatorisch oder rotatorisch – und bezüglich der Erzeugung der nötigen Anpresskraft erfolgen. Häufig genutzte Quellen für diese Kraft sind Gravitation, Federn und magnetische Anziehung. Andere Quellen wie z. B. die elektrostatische Anziehung [PMR+02] sind ebenfalls denkbar, werden derzeit jedoch nach Wissen der Autoren noch in keinem Prototypen eingesetzt. Verglichen mit anderen piezoelektrischen Motoren ist der Aufbau von Trägheitsmotoren sehr einfach – sie bestehen aus wenigen einfach zu fertigenden Bauteilen und werden mit einem einzigen Eingangssignal angesteuert.

Die ersten PTMen wurden 1987 als Hochpräzisions-Positioniereinrichtungen für den Einsatz in der Mikroskopie, z. B. in Rastertunnelmikroskopen, vorgestellt [Poh87], [ATH87]. Auch die meisten darauffolgend veröffentlichten PTMen wurden für ähnliche Anwendungen entwickelt, z. B. [YHS+90], [BJB92], [SAS+96]. Sie nutzen dabei die Kombination des in Bild 1 dargestellten Schrittmodus zur Grobpositionierung mit der Möglichkeit, durch Anlegen einer Gleichspannung an den piezoelektrischen Aktor diesen beliebig fein auszulenken und erreichen so eine Genauigkeit im Nanometer-Bereich [BBC02]. Diese Trägheitsmotoren sind meist Einzelstücke und bedingt durch den Einsatzzweck weder besonders klein noch optimiert in Hinsicht auf Tragfähigkeit oder Geschwindigkeit.

In den letzten Jahren wurden eine Reihe von PTMen vorgestellt, die für andere Einsatzzwecke konzipiert wurden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Geschwindigkeit, Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit, Einfachheit und guter Miniaturisierbarkeit. Zum Einsatz kommen können solche Motoren beispielsweise in Zoomlinsen

von Mobiltelefon- und PDA-Kameras oder beim Verwacklungsschutz in Digitalkameras [Uch08], [MOY+07], [KLY+06], [Kon08-ol].

Bei der Entwicklung eines PTMs sind verschiedene Fragen zu beantworten: Wie groß sollen die bewegten Massen sein? Welche Anpresskraft ist sinnvoll? Wie werden die Reibflächen gestaltet? Mit welchem elektrischen Signal wird der Motor bei welcher Frequenz angesteuert? Derzeit besteht die Entwicklung eines PTMs für eine gegebene Anwendung weitgehend aus dem Bau und Test von Prototypen. Der konstruktive Aufbau wird dabei zumeist aus bekannten Bauarten abgeleitet und gemäß den neuen Anforderungen iterativ verbessert. Eine effektive, exakt anwendungsbezogene Auslegung der Motoren ist so nicht möglich.

Es existieren einige Arbeiten, die sich mit der Beschreibung der grundlegenden Arbeitsweise einzelner PTMen befassen und dabei auch den Einfluss einzelner konstruktiver Parameter untersuchen, z. B. [Büc96], [Zes97], [Bre98], [JNL00]. Ein allgemeines Modell, mit dem die Abläufe in einem beliebigen PTM beschrieben werden können, existiert jedoch nicht. Anhand eines solchen Modells könnte eine Methodik für die systematische und anwendungsorientierte Entwicklung verbesserter PTMen erarbeitet werden. Das Aufstellen eines derartigen Modells und die Erarbeitung einer solchen Entwicklungsmethodik sind Ziel unserer Forschung, deren erste Schritte im Folgenden beschrieben werden.

2 Versuchsmotor

Wir beschränken uns zunächst auf Motoren mit feststehendem Aktor. Ein wesentlicher Vorteil dieser Bauart ist, dass die elektrischen Zuleitungen des Aktors nicht mitbewegt werden müssen. Zudem ist die Messung der Auslenkung des Aktors wesentlich einfacher. Die erlangten Erkenntnisse sollten am Ende leicht auf Motoren mit mitbewegtem Aktor übertragen werden können.

2.1 Aufbau

Für unsere Untersuchungen haben wir einen Motor aufgebaut, der auf einem piezoelektrischen Vielschicht-Aktor basiert, siehe Bild 2. Auf Grund der im Betrieb auftretenden hohen Beschleunigungen muss der Aktor vorgespannt werden, um eine Beschädigung zu vermeiden. Wir verwenden hierzu einen Spannrahmen aus Kunststoff. Diese Art der Vorspannung kommt ohne zusätzliche Bauteile aus und hält den Aktor für Messungen zugänglich. Auf dem Spannrahmen ist ein Stahlstab mit quadratischem Querschnitt befestigt. Dieser Stab bewegt einen Schlitten, der durch Magnetkraft an den Stab gepresst wird. Um verschiedene Lastfälle untersuchen zu können, sind mehrere Motorparameter variabel: Der Neigungswinkel des Stabs kann frei verstellt werden, durch unterschiedliche Magnete und Gewichte

können Anpresskraft und Last das Schlittens eingestellt werden. Um den Einfluss der Reibpaarung untersuchen zu können, existieren Schlitten aus verschiedenen Materialien.

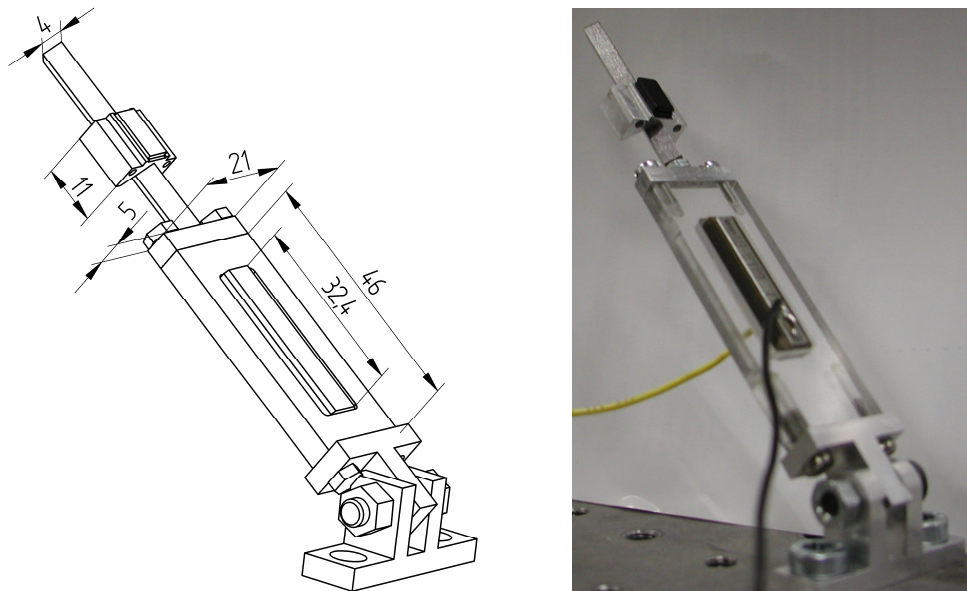


Bild 2: CAD-Modell und Foto des aufgebauten Motors

2.2 Modellierung

Für die Modellierung des Motors liegt es nahe, diesen gedanklich in seine drei Hauptbestandteile – piezoelektrischer Aktor, Antriebsstab und Schlitten – aufzuteilen und diese zunächst einzeln zu betrachten. Zur Untersuchung der Beziehungen zwischen den drei Teilen des Motors soll das in Bild 3 dargestellte Starrkörpermodell verwendet werden. Die darin verwendeten Symbole sind in Tabelle 1 erläutert.

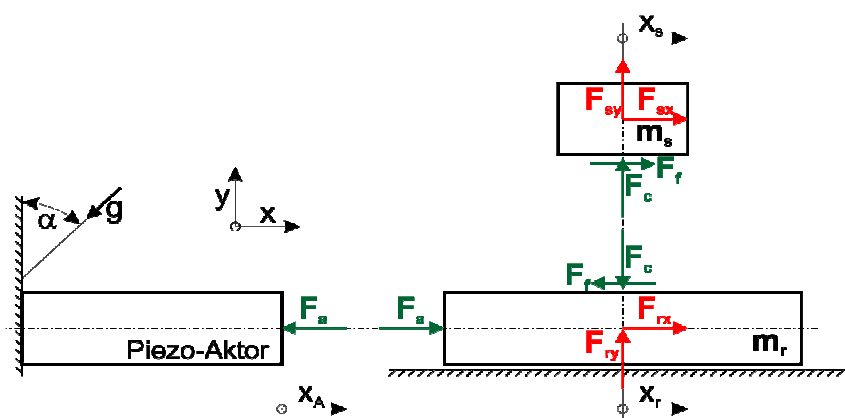


Bild 3: Starrkörpermodell des untersuchten Motors

Tabelle 1: Im Starrkörpermodell verwendete Symbole

| | |
|----------|--|
| F_a | Kraft zwischen Piezo-Aktor und Stab |
| F_c | Anpresskraft zwischen Stab und Schlitten |
| F_f | Reibkraft zwischen Stab und Schlitten |
| F_{rx} | externe Kraft auf den Stab in x-Richtung (Ursachen z. B. Anpressmechanismus, Gravitation, Last, Umgebungsmedium, etc.) |
| F_{ry} | externe Kraft auf den Stab in y-Richtung |
| F_{sx} | externe Kraft auf den Schlitten in x-Richtung |
| F_{sy} | externe Kraft auf den Schlitten in y-Richtung |
| α | Winkel zur Gravitation = Steigungswinkel des Motors |
| x_a | Auslenkung des Piezo-Aktors |
| x_r | Weg des Stabs |
| x_s | Weg des Schlittens |

Damit das Starrkörpermodell gültig ist, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- Der Piezo-Aktor regt den Antriebsstab rein axial an, Biege- und Torsionsschwingungen werden nicht oder in vernachlässigbarer Größe angeregt.
- Im Antriebsstab werden keine Längsschwingungen angeregt.

Der piezoelektrische Aktor wirkt im Starrkörpermodell über die Aktorkraft F_a und die Auslenkungsbedingung $x_a=x_r$ auf den Antriebsstab. Der – im mechanischen Starrkörpermodell nicht dargestellte – Eingang des Aktors ist elektrisch, entweder eine Spannung oder eine Ladung. Ein geeignetes Modell für den piezoelektrischen Aktor ist essentieller Bestandteil eines Modells für den Gesamtmotor. Es muss das Verhältnis zwischen elektrischem Eingang und mechanischem Ausgang möglichst genau beschreiben. Hierbei ist insbesondere das dynamische Verhalten des Aktors von Interesse, das sich in seinem Frequenzgang widerspiegelt.

2.3 Schwingungsanalyse

Bild 4 zeigt den Verlauf des Betrags der elektrischen Admittanz $Y_{ei}=i/u$ des piezoelektrischen Aktors. Bevor er in den Spanrahmen eingesetzt wird, zeigt er genau eine Resonanzüberhöhung bei 37,6 kHz. Nach dem Einspannen hat sich die Frequenz der größten Admittanz auf 39,3 kHz nach oben verschoben und es sind mehrere unterschiedlich stark ausgeprägte Nebenresonanzen zu erkennen. Offen-

bar handelt es sich hier um Schwingungen des Spannrahmens oder des Antriebsstabs, die auf den Aktor zurückwirken.

Derartige Schwingungsmoden sollen aus zwei Gründen vermieden werden: Zum einen erschweren zusätzliche Resonanzen die hinreichend genaue Modellierung des piezoelektrischen Aktors. Zum anderen können die zusätzlichen Schwingungsformen die gewünschte Bewegung des Antriebsstabs in unvorhersehbarer Weise beeinträchtigen.

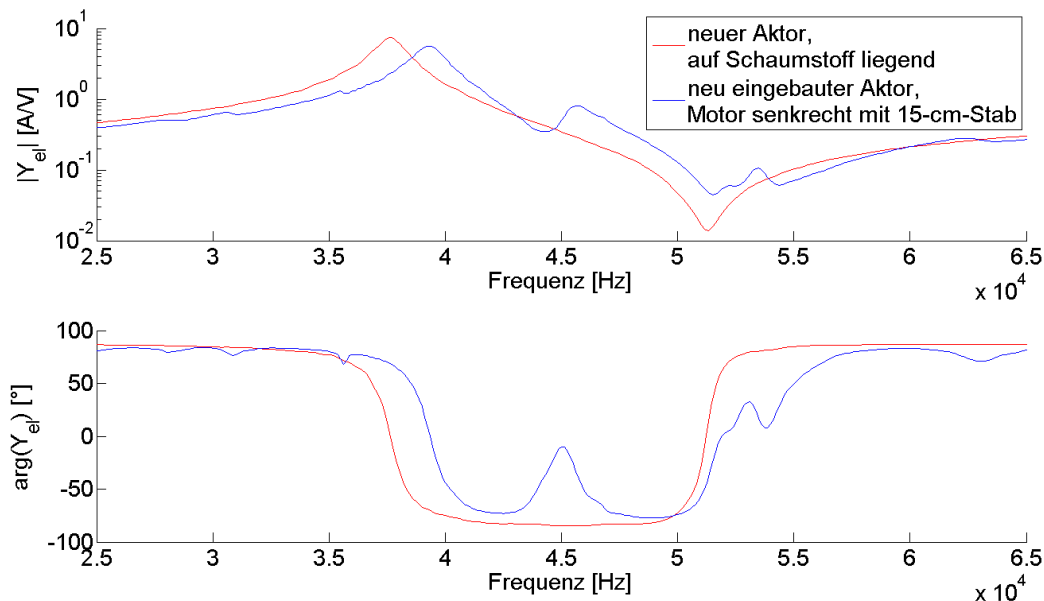


Bild 4: Elektrische Admittanz des piezoelektrischen Aktors

Um geeignete Maßnahmen zur Vermeidung der unerwünschten Resonanzschwingungen zu entwickeln, muss zunächst bestimmt werden, um welche Schwingungsmoden es sich handelt. Eine Möglichkeit hierzu ist die messtechnische Erfassung der einzelnen Schwingungsmoden, z. B. mit einem geeigneten Laser vibrometer. Angesichts der Vielzahl der auftretenden Moden – allein im in Bild 4 dargestellten Bereich von 25 bis 65 kHz sind neun unterschiedlich stark ausgeprägte Resonanzüberhöhungen zu erkennen – nutzen wir stattdessen ein Finite-Elemente (FE)-Modell des Aufbaus zur Analyse. Diese Vorgehensweise hat zudem den Vorteil, dass mögliche Maßnahmen zur Unterdrückung der Moden direkt am Modell untersucht werden können, ohne dass Prototypen angefertigt werden müssen.

In unseren Untersuchungen konzentrieren wir uns auf die Aktoreinheit aus piezoelektrischem Aktor und Spannrahmen. Ziel der FE-Analysen ist eine qualitative Bestimmung der Eigenschwingungsformen. Das verwendete Modell weist einige Vereinfachungen auf, die den Berechnungsaufwand deutlich reduzieren. Die Form der auftretenden Schwingungen wird dadurch nicht wesentlich beeinflusst, jedoch verändern sich ggf. Frequenz und Amplitude der einzelnen Moden.

Für den Antriebsmechanismus wesentlich sind die Bewegungen der Stirnfläche der Antriebseinheit, da hier die Antriebsstange montiert ist. Im FE-Modell kann die Auslenkung des Fußpunkts der Antriebsstange leicht ausgegeben werden, für Messungen mit dem Laservibrometer ist diese Stelle jedoch unzugänglich. Daher wird der Frequenzgang der Auslenkung für zwei Punkte auf der Stirnfläche der Antriebseinheit berechnet: Für den Fußpunkt der Antriebsstange und für einen Punkt, der etwas nach außen verschoben liegt und dem Messpunkt entspricht. Unterschiede zwischen diesen beiden Frequenzgängen deuten auf eine Verdrehung oder Biegung der Stirnfläche der Antriebseinheit hin, die zu einer ungewünschten Biegeanregung der Antriebsstange führen kann.

In Bild 5 sind die berechneten Frequenzgänge zusammen mit den gemessenen Frequenzgängen der elektrischen (i/u) und mechanischen (v/u) Übertragungsfunktionen der Antriebseinheit dargestellt. Die Werte wurden aus jeweils drei Messungen gemittelt. Zwischen diesen Messungen wurde das Gelenk gelöst, mit dem der Spannrahmen ausgerichtet wird, und der Laser wurde neu ausgerichtet. Die in Bild 5 nicht dargestellten Einzelmessungen zeigen alle einen ähnlichen Verlauf, jedoch mit leichten Unterschieden. Die Ursache hierfür ist, dass bei der Neuausrichtung des Spannrahmens dessen Orientierung und Einspannung leicht verändert werden. Bei der Messung der Auslenkung kommt hinzu, dass der Laserstrahl nach der Neuausrichtung nicht auf exakt denselben Punkt des Rahmens trifft.

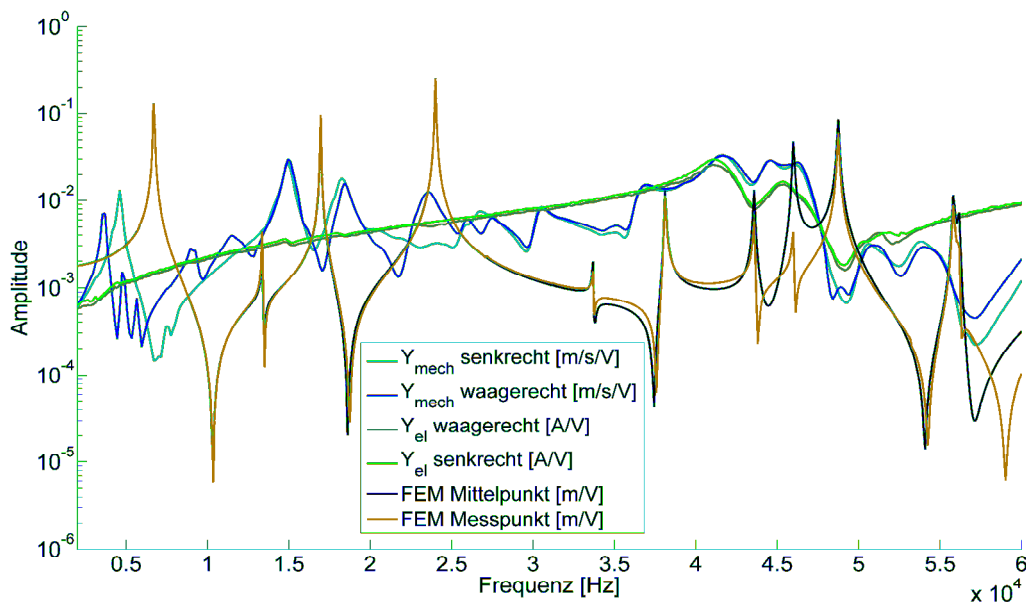


Bild 5: Berechnete und gemessene Frequenzgänge verschiedener Übertragungsfunktionen der Antriebseinheit

In der FE-Berechnung wurde die Einspannung als feste Lagerung der hinteren Fläche des Spannrahmens modelliert und die Schwerkraft wurde nicht berücksichtigt. In der Realität hat die Einspannung eine endliche Steifigkeit und auf den Spannrahmen wirkt die Schwerkraft. Diese beiden Ursachen verändern die

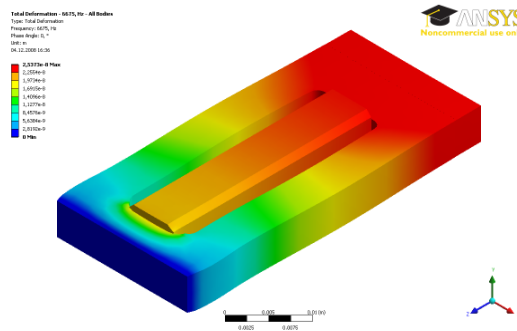
Schwingungsformen in Abhängigkeit der Ausrichtung und bewirken so die unterschiedlichen Frequenzgänge bei senkrechter und waagerechter Einspannung.

Einen ersten Anhaltspunkt für die Zuordnung der berechneten Schwingungsformen zu den gemessenen Resonanzen liefert das elektromechanische Verhalten des piezoelektrischen Aktors. In Resonanz wird der Aktor maximal verformt und nimmt viel Strom auf. In Bild 5 sind zwei wesentliche Überhöhungen im Frequenzgang der elektrischen Übertragungsfunktion zu erkennen (bei ca. 41 kHz und ca. 45 kHz). Dabei bleibt zunächst unklar, wie die zugehörigen Schwingungsformen aussehen und welche der Schwingungsformen für den Antriebsmechanismus zu bevorzugen ist. Aufschluss bietet hier die FE-Analyse. Aus der Vielzahl der berechneten Schwingungsmoden sind jene herauszufinden, bei denen der Aktor symmetrische Längsschwingungen mit großer Amplitude ausführt. Dies ist bei ca. 46 kHz und ca. 49 kHz der Fall, siehe Bilder 6 (b) und 6 (c). Die Abweichung von berechneten und gemessenen Frequenzen ist auf die vereinfachte Modellierung des Piezoaktors zurückzuführen: Im Modell wurde kein Vielschichtaktor, sondern ein deutlich steiferer massiver piezokeramischer Block abgebildet, um Rechenzeit einzusparen. Bei der in Bild 6 (b) gezeigten Schwingungsform führt der Piezo-Aktor eine Längsschwingungsform aus, die auf den Spannrahmen zum Teil übertragen wird. Zusätzlich bilden sich Biegebewegungen in den Stegen des Spannrahmens aus. Wünschenswert wäre, diese Biegebewegungen gänzlich zu vermeiden und stattdessen eine möglichst große, gleichförmige Auslenkung an der Stirnseite des Antriebselements zu erzeugen. Bei den in den Bildern 6 (c) bis 6(e) gezeigten Schwingungsformen wird dieses Ziel gänzlich verfehlt.

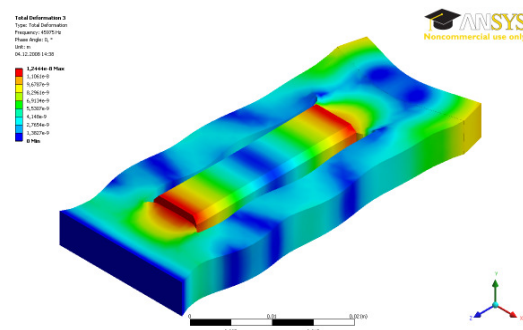
Bei einem genaueren Vergleich der gemessenen und berechneten Frequenzgänge fällt auf, dass die gemessenen Frequenzgänge in dem dargestellten Frequenzbereich mehr Überhöhungen aufweisen als die durch eine harmonische FE-Analyse mit piezoelektrischer Anregung berechneten Frequenzgänge. Dieses liegt wiederum in der vereinfachten Modellierung bzw. in der nicht perfekten realen Ausführung des Antriebselementes begründet. Durch Unsymmetrien des Aufbaus, z. B. einen nicht exakt mittig eingebauten Aktor, können auch nichtsymmetrische Schwingungsformen angeregt werden. Diese Schwingungsformen werden bei der harmonischen Analyse nicht ermittelt, da Geometrie und Anregung des FE-Modells ideal symmetrisch sind. Durch eine zusätzliche Modalanalyse, bei der die Elektroden des piezoelektrischen Aktors im Modell kurzgeschlossen werden, können auch diese Schwingungsformen ermittelt und durch ihre Lage im Frequenzband den gemessenen Ergebnissen zugewiesen werden. Beispiele dafür sind die in den Bildern 6 (d) und 6 (e) dargestellten Schwingungsformen.

Die Untersuchung der übrigen im FE-Modell auftretenden Resonanzen zeigt, dass es sich fast ausnahmslos um Biegeschwingungen der Rahmenseiten handelt. Ausschließlich bei ca. 6,7 kHz existiert eine weitere Schwingungsform, bei der haupt-

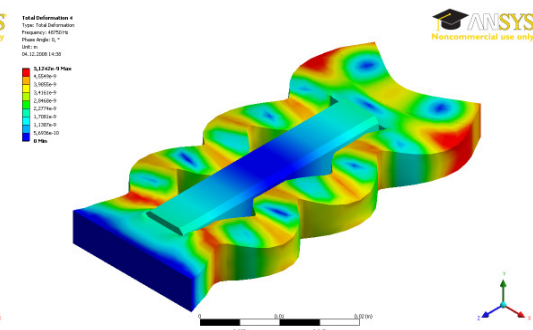
sächlich der Aktor und die Stirnseite der Antriebseinheit ausgelenkt werden, siehe Bild 6 (a).



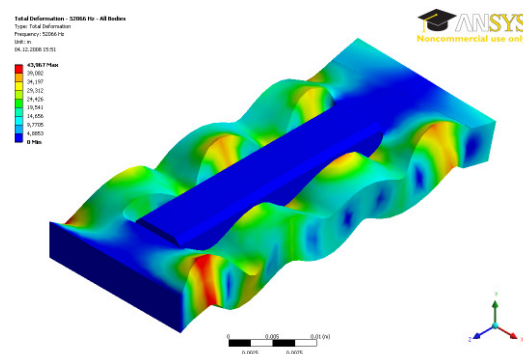
(a) angeregt bei 6,675 kHz



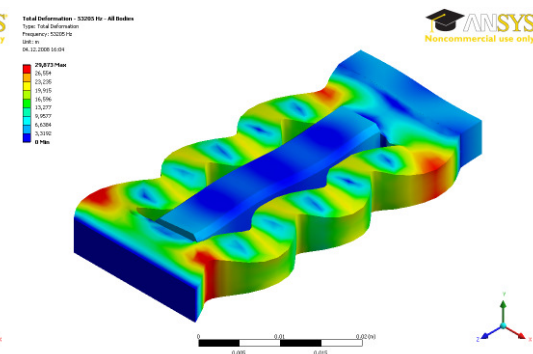
(b) angeregt bei 45,975 kHz



(c) angeregt bei 48,750 kHz



(d) Eigenmode bei 52,066 kHz



(e) Eigenmode bei 53,205 kHz

Bild 6: Ausgewählte Schwingungsformen der Antriebseinheit

Es handelt sich um die erste Längsschwingungsform des einseitig fixierten Spannrahmens, bei der der Aktor quasi als starre Masse mitbewegt wird. Diese Schwingungsform ist für die Ankopplung der Antriebsstange optimal, da die Stirnseite der Antriebseinheit gleichförmig ausgelenkt wird. Es treten auch keine möglicherweise störenden Biegebewegungen in den Stegen auf. Nachteilig ist jedoch, dass der piezoelektrische Aktor bei dieser Frequenz keine große Amplitude erzielt. Bei Betrieb des Motors mit dieser Schwingungsform kann nur eine sehr geringe Geschwindigkeit erzielt werden. Eine deutlich bessere Funktion wäre möglich, wenn

es gelingt, die Längsschwingungsform des Spannrahmens mit der Resonanz des Piezo-Aktors zu kombinieren.

2.4 Fazit und Ausblick

Durch den kombinierten Einsatz von verschiedenen Berechnungs- und Messmethoden konnte das Schwingungsverhalten der piezoelektrischen Antriebseinheit eines Trägheitsmotors in effizienter Weise detailliert untersucht werden. Als Ergebnis der Untersuchungen steht nun fest, dass die Antriebseinheit überarbeitet werden muss, bevor ein geeignetes Modell erstellt und parametrisiert werden kann. Die zahlreichen derzeit auftretenden Biegeschwingungen im Spannrahmen auch deutlich unterhalb der eigentlichen Resonanz des piezoelektrischen Aktors sind nicht akzeptabel, der Spannrahmen muss neu gestaltet werden. Hierbei sind verschiedene Ansätze möglich. Für den Spannrahmen sollte ein anderes Material verwendet werden, da mit dem verwendeten Kunststoff aufgrund seines niedrigen Elastizitätsmoduls kaum die benötigten hohen Resonanzfrequenzen erreicht werden können.

Für die neue, überarbeitete Antriebseinheit muss anschließend ein ihrem Frequenzverhalten basierendes dynamisches Modell erstellt werden. Verknüpft mit dem bestehenden Starrkörpermodell ergibt es ein vollständiges dynamisches Modell eines piezoelektrischen Trägheitsmotors. Das Modell wird für Parameterstudien und einen Vergleich verschiedener Ansteuerungsprinzipien genutzt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Entwicklung verbesserter Trägheitsmotoren und sind Grundlage für die angestrebte Entwicklungsmethodik für piezoelektrische Trägheitsmotoren.

Literatur

- [ATH87] ANDERS, M.; THAER, M., HEIDEN, C.: "Simple micropositioning devices for STM." *Surface Science* 181, no. 1-2 (März 1987): 176-182.
- [BBC02] BERGANDER, A.; BREGUET, J.-M. UND CLAVEL, R.: "Micropositioners for microscopy applications and microbiology based on piezoelectric actuators." *Journal of Micromechatronics* 2, no. 1 (April 2002): 65-76.
- [BJB92] BLACKFORD, B. L.; JERICO, M. H. UND BOUDREAU, M. G.: "A vertical/horizontal two-dimensional piezoelectric driven inertial slider micropositioner for cryogenic applications." *Review of Scientific Instruments* 63, no. 4 (April 1992): 2206-2209.
- [Bre98] BREGUET, J.: "Actionneurs "Stick and Slip" pour Micro-Manipulateurs." Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.
- [Büc96] BÜCHI, R.: "Modellierung und Regelung von Impact Drives für Positionierungen im Nanometerbereich." ETH Zürich, 1996.
- [JNL00] JIANG, T. Y.; NG, T. Y., LAM, K. Y.: "Optimization of a piezoelectric ceramic actuator." *Sensors and Actuators A: Physical* 84, no. 1-2 (August 1, 2000): 81-94.
- [KLY+06] KO, H.-P.; LEE, K.-J.; YOO, K.-H.; KANG, C.-Y.; KIM, S. UND YOON, S.-J.: "Analysis of Tiny Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor." *Japanese Journal of Applied Physics* 45 (Mai 2006): 4782-4786.
- [Kon08-01] http://www.konicaminolta.com/about/research/core_technology/picture/antiblur.html; aufgerufen am 27.02.2008, nicht mehr verfügbar am 04.12.2008
- [MOY+07] MATSUSAKA, K.; OZAWA, S.; YOSHIDA, R.; YUASA, T. UND SOUMA, Y.: "Ultracompact optical zoom lens for mobile phone," In *Proceedings of SPIE Volume 6502*, 2007.
- [PMR+02] PEICHEL, D.; MARCUS, D.; RIZQ, R.N.; ERDMAN, A.G.; ROBBINS, W.P. UND POLLA, D.L.: "Silicon fabricated submicrometer stepper motor for microsurgical procedures." *Journal of Microelectromechanical Systems* 11, no. 2 (2002): 154-160.
- [Poh87] POHL, D. W.: "Dynamic piezoelectric translation devices." *Review of Scientific Instruments* 58, no. 1 (Januar 1987): 54-57.
- [SAS+96] SMITH, W. F.; ABRAHAM, M. C.; SLOAN, J. M. UND SWITKES, M.: "Simple retrofittable long-range x-y translation system for scanned probe microscopes." *Review of Scientific Instruments* 67, no. 10 (Oktober 1996): 3599-3604.
- [Uch08] UCHINO, K.: "Piezoelectric Motors for Camera Modules." In *ACTUATOR 2008 Conference Proceedings*, 157-160. Bremen, 2008.
- [YHS+90] YAMAGATA, Y.; HIGUCHI, T.; SAEKI, H. UND ISHIMARU, H.: "Ultrahigh vacuum precise positioning device utilizing rapid deformations of piezoelectric elements." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 8, no. 6 (November 1990): 4098-4100.
- [Zes97] ZESCH, W.: "Multi-Degree-of-Freedom Micropositioning Using Stepping Principles." ETH Zürich, 1997.

Autoren

Dipl.-Ing. Matthias Hunstig, Jahrgang 1981, studierte von 2002 bis 2007 Maschinenbau mit Fachrichtung Produktentwicklung an der Universität Paderborn. Seit Januar 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Seine Forschungsschwerpunkte sind Energy Harvesting und piezoelektrische Antriebe.

Dr.-Ing. Tobias Hemsel, Jahrgang 1970, vertritt seit Mai 2008 den Lehrstuhl Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Nach seinem Studium des Maschinenbaus an der Universität Paderborn war er von 1996 bis 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek. Er promovierte 2001 mit Auszeichnung und erhielt eine Dauerstelle als Oberingenieur. Tobias Hemsel ist seit 2003 akademischer Oberrat, wurde 2003 und 2005 mit dem Forschungspreis der Universität Paderborn ausgezeichnet und hat mehr als 30 wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht. Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre liegen im Bereich der Sensorik und Aktorik mit Fokus auf piezoelektrische Systeme und Ultraschalltechnik.