

Veröffentlichungen am IKFF



Linearer Wanderwellenmotor
Ergebnisse einer Motoroptimierung

J. Haug, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zur
Tagung
Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik
17. - 18. März 2004
Darmstadt

© 2004 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Linearer Wanderwellenmotor - Ergebnisse einer Motoroptimierung

Dipl.-Ing. Jens Haug, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF), BRD

Kurzfassung

In der Feinwerktechnik finden neben konventionellen Antrieben auch andere Wirkprinzipie Einsatz. Unter Nutzung des inversen piezoelektrischen Effektes bieten sich für kontinuierliche Bewegungen beispielsweise Wanderwellenmotoren an. In deren Statorn werden resonante Schwingungen erregt, zu Wanderwellen überlagert und durch Reibschluss eine Bewegung auf den Abtrieb übertragen. Dabei sind auch lineare Wanderwellenmotoren realisierbar. Neben der für Direktantriebe typischen hohen Dynamik weisen derartige Antriebe Selbsthemmung auf und können somit ihre Position im stromlosen Zustand halten. Am Beispiel einer optimierten Motorbauform eines linearen Wanderwellenmotors werden Aufbau und Parameter erläutert.

1 Einleitung

Piezoelektrisch erregte Wanderwellenmotoren basieren auf einer reibschlüssigen Kraftübertragung zwischen einem feststehenden, aber mit einer umlaufenden Wanderwelle beaufschlagten Stator und einem reibschlüssigen Läufer. Die Erregung der Wanderwelle erfolgt durch Piezokeramiken am Stator.

Durch die piezoelektrische Anregung wird der Stator (meist ein Statorring) in resonante Schwingungen versetzt, wobei zwei orthogonale Eigenformen gleichen Typs und gleicher Ordnung, die bei derselben Frequenz auftreten (degenerieren), angeregt und zu einer fortlaufenden Wanderwelle überlagert werden. Die Oberflächenpunkte des Stators, die mit dem Abtrieb reibschlüssig verbunden sind, beschreiben dabei elliptische Trajektorien. Durch den Reibschluss entsteht am Läufer schließlich die gewünschte Abtriebsbewegung. Man verwendet meist Frequenzen im Bereich zwischen 20 und 100 kHz, weshalb Wanderwellenmotoren auch als Ultraschallmotoren bezeichnet werden.

Erste marktreife Wanderwellenmotoren waren rotatorische Motoren mit umlaufenden Biegewellen, so genannte Shinsei-Motoren [1]. Eine interessante Variante dieses Motors stellt auch ein Hohlläufermotor dar, angewandt beispielsweise in Objektiv-Optiken von Canon [2]. Schließlich wurden auch Motoren auf der Basis umlaufender Dehnungswellen [3], umlaufender Biegung [4] und lineare Wanderwellenmotoren entwickelt, z. B. [5, 6]. Eine Übersicht zu den einzelnen Motorvarianten gab bereits [7]. Hier sollen nun Ergebnisse der Optimierung eines linearen Wanderwellenmotors nach [5] vorgestellt werden [8].

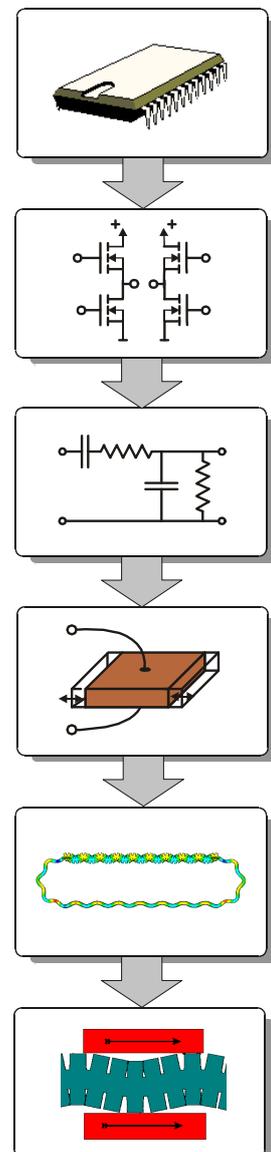
Bild 1 gibt dazu zunächst einen Überblick über die wichtigsten Elemente eines linearen Wanderwellen-

motors, ohne den Aufbau schon im Detail zu beschreiben. Dies folgt im Rahmen der Optimierung der einzelnen Komponenten dann im Anschluss.

Die Ansteuerelektronik des linearen Wanderwellenmotors besteht aus einem Logikteil, in dem die benötigten Signale erzeugt werden, und einem Leistungsteil, der die von den Piezoelementen benötigten hohen Spannungen und Ströme treibt. Um keine unerwünschten Oberwellen anzuregen, werden die Signale gefiltert an die Piezoelemente (aufgeklebt am unteren geraden Abschnitt) des Statorrings angelegt.

Durch den Quereffekt wird die Anregung auf den Stator übertragen, der mit den verwendeten orthogonalen Moden in Resonanz kommt.

Bild 1 Komponenten eines linearen Wanderwellenmotors



2 Optimierung des Gesamtsystems

Bilder 2 und 3 zeigen den Gesamtaufbau des hier realisierten linearen Wanderwellenmotors. Am oberen geraden Abschnitt ist eine Zahnstruktur angebracht, die die Auslenkung der Oberflächenpunkte in Vorschubrichtung vergrößert, ohne die Steifigkeit zu stark zu beeinflussen. Auf diese Weise wird die Abtriebsgeschwindigkeit des dort angepressten Läufers, der reibschlüssig eine Vorschubkraft erfährt, vergrößert. Die Bewegung des Läufers wird schließlich spielfrei über Membranen auf den Schlitten einer Linearführung mit Kugelumlauf übertragen. Das mechanische Teilsystem befindet sich in einem steifen Rahmen, an dem Endschalter, Befestigungsmöglichkeiten, ein Wegmesssystem usw. vorgesehen sind.

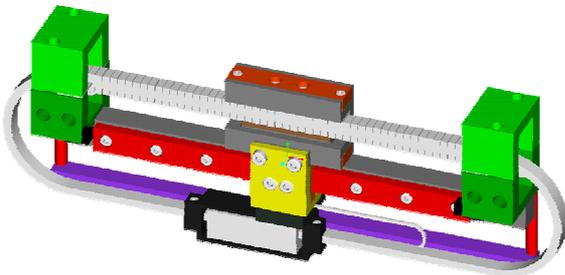


Bild 2 Gesamtsystem ohne Gehäuse



Bild 3 Reales Gesamtsystem komplett

2.1 Signalerzeugung

Die Ansteuerung von Wanderwellenmotoren in Resonanz erfordert im Allgemeinen eine Regelung auf die Resonanzfrequenz, da diese vor allem mit der Temperatur etwas driften kann. Allerdings sind die Motoren meist nicht ideal bezüglich dem Auftreten zweier degenerierender Moden. Die optimale Betriebsfrequenz liegt dann zwischen den beiden Resonanzfrequenzen der verwendeten Moden.

Bei bisherigen Prototypen des IKFF wurde ein Phase Locked Loop (PLL) zur Regelung auf die Resonanzfrequenz verwendet. Hierzu wurde ein Teil der Piezokeramik am Statorring nicht als Aktor sondern als Sensor beschaltet, **Bild 4**. Dieser liefert ein Signal

für die Auslenkung der mechanischen Schwingung. Ein herkömmlicher PLL-Baustein wertet nun die Phasenlage zwischen dieser Auslenkung und der von ihm erzeugten Anregung aus und regelt auf diese Art auf die Resonanzfrequenz eines Anregungsbereiches. Das Signal für den zweiten Anregungsbereich folgt diesem mit konstanter Phasenverschiebung.

Diese Schaltung lässt sich sehr kostengünstig und einfach mit Standard-Bauteilen aufbauen. Nachteilig ist hierbei, dass bei leicht voneinander abweichenden Resonanzfrequenzen der verwendeten Moden nicht unbedingt ein optimaler Betriebspunkt gefunden wird und die Regelparameter vom Entwickler nur schlecht zu beeinflussen sind.

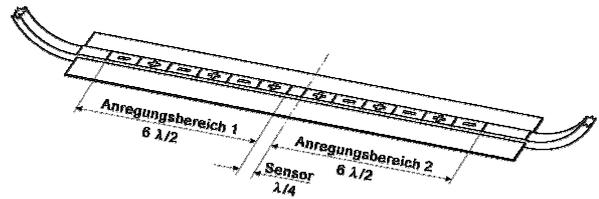


Bild 4 Übliche Lösung zur Verteilung der beiden Anregungsbereiche und des Sensors

Durch die Verwendung eines Microcontrollers ist der Entwickler frei in der Gestaltung des Reglers und hat vollen Einfluss auf die verwendeten Parameter. Es können Sensor-Signale von entsprechenden Piezo-Segmenten verwendet werden, um auf eine maximale Amplitude oder eine entsprechende Phasenlage zu regeln.

Eine interessante Alternative zur Nutzung von Sensorelementen stellt allerdings die Auswertung der am Aktor anliegenden Spannungen und der von ihm aufgenommenen Ströme durch eine Messung in der Leistungsendstufe dar. Da sich die Admittanz eines elektromechanischen Wandler in der Nähe der Resonanz in Betrag und Phasenlage drastisch ändert, kann auf diese Weise auf die Resonanz geschlossen werden.

Im Rahmen der Motoroptimierung kam daher ein Microcontroller zum Einsatz, der von beiden Anregungsbereichen den aufgenommenen Strom und die anliegende Spannung bzw. deren Produkt, die Leistung, und deren Quotienten, die Admittanz, messen kann. Nach dem Einschalten bzw. je nach Anwendungsfall auch zu anderen Zeitpunkten kann der Microcontroller durch Messung eines Frequenzganges den optimalen Betriebspunkt bestimmen.

Über integrierte PWM-Module gibt der Controller dann in dieser Betriebsfrequenz Signale aus, die in den Leistungs-Endstufen zu den in **Bild 5** dargestellten Spannungsverläufen an den Ausgängen A und B führen. Das Tastverhältnis kann dabei entsprechend der gewünschten Geschwindigkeit des Motors vom Controller variiert werden.

Wird das Tastverhältnis klein gewählt, so sind die resultierenden Anregungsspannungen an der Piezokeramik und damit die Schwingungsamplituden klein und der Motor wird langsamer. Dies ist jedoch nur so lange möglich wie am Läufer keine Haftreibung einsetzt. Um sehr langsame Bewegungen zu erzielen, wird daher bei bleibendem Tastverhältnis die Phasenlage zwischen den Anregungsbereichen verändert. Die resultierende Schwingung ist dann eine Überlagerung einer stehenden mit einer wandernden Welle. Die stehende Welle unterbindet dabei die Haftreibung, während die sehr kleine Wanderwelle für einen langsamen Vorschub sorgt.

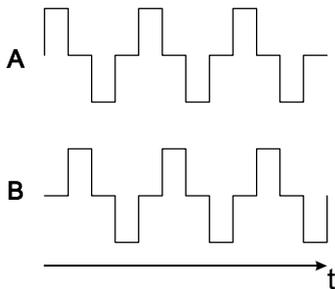


Bild 5 Signale nach der Endstufe

An den Microcontroller sind eine numerische Tastatur und eine 7-Segment-LED-Anzeige angeschlossen, um Benutzer-Interaktion im manuellen Betrieb zu ermöglichen. Außerdem ist eine serielle RS-232-Schnittstelle für die Ansteuerung durch einen übergeordneten Rechner vorgesehen.

2.2 Leistungs-Endstufe

Die Signale für die beiden Anregungsbereiche werden je zwei Halbbrücken-Endstufen zugeführt, die eine Spannung von bis zu 60 V schalten. Da die Piezokeramik mit wesentlich höheren Spannungen arbeiten kann, kommen Übertrager zum Einsatz, an deren Sekundärseite bis zu 200 V entstehen. Die im Rechtecksignal der schaltenden Endstufen enthaltenen Oberschwingungen können keinen Beitrag zur Anregung der Betriebsfrequenz leisten und werden daher durch eine geeignete Filterung unterdrückt.

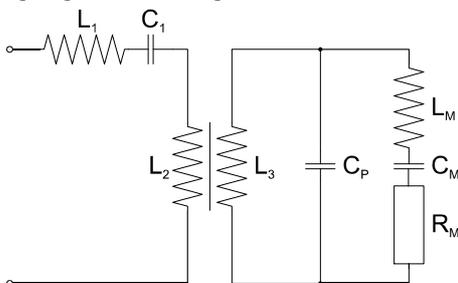
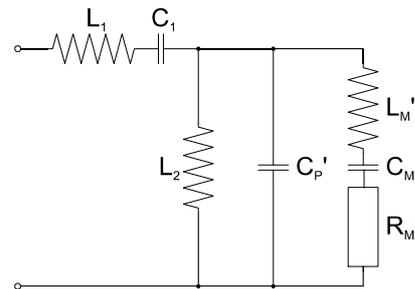


Bild 6 Ersatzschaltbild (1)

Das mechanische System tritt in der Umgebung seiner Resonanzfrequenz im elektrischen Ersatzschaltbild (**Bild 6**) als Serienschwingkreis in Erscheinung, allerdings sollte bei der Betriebsfrequenz hiervon nur der ohmsche (reelle) Anteil der Impedanz verbleiben. Die Induktivität der Primärseite des Übertragers ist mit der Kapazität des Piezos, einer weiteren Spule und einem zusätzlichen Kondensator so abgestimmt, dass sich der in **Bild 7** gezeigte Bandpass ergibt, der in der Betriebsfrequenz optimal filtert. Hierbei muss in der Praxis ein Kompromiss gewählt werden zwischen Unempfindlichkeit gegenüber Frequenzänderungen, Unterdrückung von Oberwellen und erreichter Spannungsamplitude.



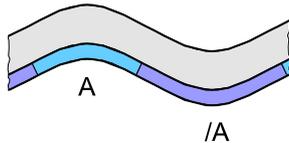


Bild 9 Schematische Darstellung der konventionellen Anbringung der Piezokeramik

Im Rahmen der Motoroptimierung wurde auch hierzu nach besseren Lösungsansätzen gesucht. Zur vereinfachten Darstellung seien die unterschiedlich polarisierten Bereiche nur noch mit A bzw. /A gekennzeichnet. **Bild 9** zeigt in dieser Darstellung nochmals die konventionelle Anordnung. Eine deutlich stärkere Anregung lässt sich erreichen, wenn die Piezokeramik in viertel Wellenlängen aufgeteilt wird, wobei die Segmente abwechselnd beiden Anregungsbereichen zugeordnet werden (**Bild 10**).

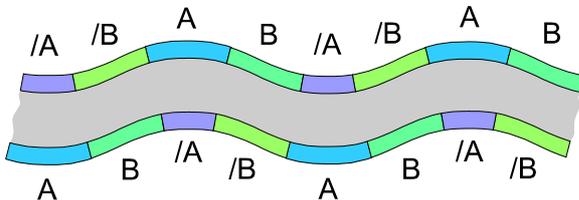


Bild 10 Neue Anbringung der Piezokeramik

Da bei linearen Wanderwellenmotoren außerdem die geraden Abschnitte für die Anregung und für den Bewegungsabgriff voneinander getrennt sind, können Piezos auf beiden Seiten des Anregungsbereiches des Stators angebracht werden. Das aktive Material wird so nochmals verdoppelt. Bei dieser neuen Anordnung der Piezoelemente mit $\lambda/4$ -Teilung ergibt sich allerdings die Notwendigkeit, für jedes Segment eine eigene Kontaktierung vorzusehen. Dies stellt eine hohe technologische Anforderung dar und führt zu einer vergleichsweise aufwändigen Kontaktierung.

Eine thermische Schädigung der Piezokeramik beim Lötten wurde durch die Verwendung von niedrig schmelzendem und gut fließendem Silberlot vermieden. Die Lötunkte sollten jeweils nur sehr klein sein und nur eine minimale zusätzliche Masse einbringen, da die Resonanzfrequenzen schon durch wenige Milligramm deutlich verschoben werden können.

Auf die Qualität der Klebeschicht zwischen Piezokeramik und Statorring muss besonderer Wert gelegt werden. Sie muss möglichst steif sein, um eine gute Ankopplung zu gewährleisten und sollte daher sehr dünn ausgeführt werden und voll aushärten.

Insgesamt hat sich der Übertragungsfaktor von ca. $0,02 \mu\text{m/V}$ [5] auf ca. $0,05 \mu\text{m/V}$ mehr als verdoppelt, d.h. bei einer anregenden Spannung von beispielsweise 100 V erreicht der Stator jetzt eine Schwingungsamplitude von 5 μm anstatt zuvor 2 μm .

2.4 Statorring

Bei rotationssymmetrischen Strukturen wie dem Statorring des Shinsei-Motors existieren stets orthogonale Moden mit gleicher Resonanzfrequenz. Bei anderen, nicht rotationssymmetrischen Strukturen ist die Existenz von degenerierenden Moden ein Sonderfall für bestimmte geometrische Verhältnisse.

Lineare Wanderwellenmotoren nutzen im Allgemeinen zwar auch in sich geschlossene Statorringe, um in Resonanz arbeiten zu können. Diese haben jedoch gerade Abschnitte mit einer dem Bewegungsbereich entsprechenden Länge und sind somit nicht rotationssymmetrisch.

Um trotzdem eine geeignete Geometrie mit degenerierenden Moden zu finden, werden einzelne Geometrieparameter schrittweise verändert und in FEM-Analysen die Eigenformen und -frequenzen bestimmt. Der Qualität des FEM-Modells kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Problemstellen sind insbesondere die Klebeschichten zwischen Piezokeramik und Metall und die Anordnung der Piezosegmente.

In entsprechenden Analysen wurde außerdem untersucht, inwieweit die durch Lötunkte aufgebrauchten zusätzlichen Massen die Resonanzfrequenzen verschieben. Dabei wurde festgestellt, dass der Einfluss dieser Zusatzmassen im Bereich bis 1 mg völlig unproblematisch ist, bis etwa 5 mg ist er noch akzeptabel. Bei über 5 mg besteht bereits die Gefahr, dass die beiden Resonanzfrequenzen nicht im selben Maße verschoben werden und die verwendeten Moden nicht mehr degenerieren.

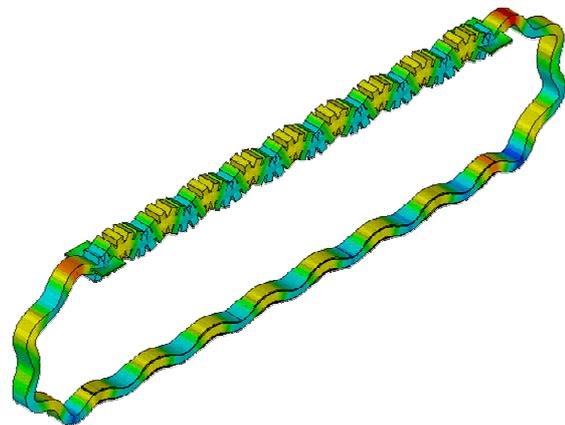


Bild 11 Momentaufnahme einer Wanderwelle

Bild 11 zeigt in stark überhöhter Darstellung eine Momentaufnahme der Wanderwelle in der FEM-Simulation. Der Statorring ist dabei nur mit zwei kurzen Membranen an den Enden des oberen geraden Abschnitts am Rahmen befestigt, sodass die Anordnung gegenüber den entstehenden Vorschubkräften sehr steif, gegenüber der umlaufenden Biegewelle jedoch weich ist.

2.5 Reibbelag und Läufer

Der Abtrieb eines Wanderwellenmotors erfolgt reibschlüssig (**Bild 12**). Deshalb muss besonderer Wert auf die Gestaltung des Läufers und die Auswahl des Reibbelages gelegt werden.

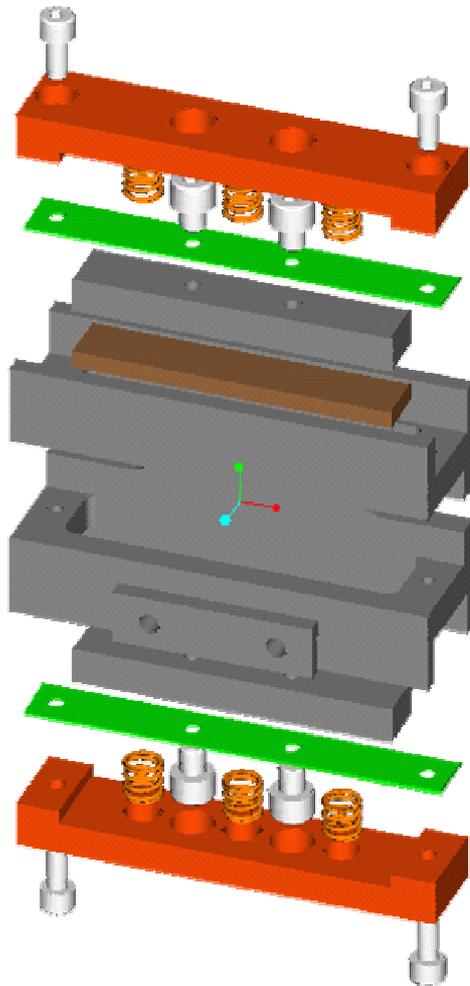


Bild 12 Läufer und Läuferahmen (Versuchsversion)

Im Idealfall ist die Flächenpressung zwischen Läufer und Stator völlig gleichmäßig. Dies wird in der Praxis bei Läufers mit vertretbarer Masse jedoch nicht gelingen, weil die Steifigkeit dieser Läufer endlich ist. Daher wurde in statischen FEM-Analysen untersucht, wie sich der Druck unter Aluminium-Plättchen verschiedener Geometrie bei verschiedener Krafteinleitung und mit Kunststoff-Belägen verschiedener Dicke und Steifigkeit verteilt.

Nach Optimierung konnte eine Anordnung gefunden werden, die für verschiedene realistische Dicken und Steifigkeiten von Reibbelägen eine relativ gleichmäßige Flächenpressungen ermöglicht, wobei an den beiden Enden des Läufers die Pressung jeweils minimal wird, sodass beim Verschieben des Läufers ein sanftes Eingreifen stattfinden kann.

Gleichzeitig ist es gelungen, die bewegte Masse deutlich zu reduzieren. **Bild 13** zeigt das Ergebnis in der FEM-Simulation. Die äußeren dunklen Bereiche an den Kanten werden sich von der Kontaktfläche fast abheben, im anschließenden Bereich ist die Pressung etwas stärker. Die Maxima sind hell dargestellt. Experimentelle Untersuchungen des Abtriebsverhaltens mit verschiedensten Reibbelägen sind Gegenstand abschließender Arbeiten.



Bild 13 Druckverteilung unter dem Läufer (Beispiel)

2.6 Abtrieb

Damit vom Abtrieb her keine störenden Kräfte oder Momente auf den Läufer zurück wirken, wird er über Membranen spielfrei an den Läuferahmen gekoppelt. Dieser ist mit einer Linearführung mit Kugelumlauf verschraubt. Am Schlitten dieser Führung kann dann die Vorschubkraft abgegriffen werden, siehe Bilder 2 und 3. Außerdem ist an diesem Schlitten der Lesekopf für ein optisches inkrementales Wegmesssystem angebracht, das den geregelten Positionierbetrieb ermöglicht. Durch konsequenten Leichtbau aller bewegten Teile konnte die bewegte Masse von früher 45 g ohne Wegmesssystem auf jetzt 39 g mit Wegmesssystem gesenkt werden.

In der Gesamtkonstruktion ergibt sich eine hochdynamische, spielfreie Positionierachse mit Lineardirektantrieb, die wegen des ständigen Reibschlusses den besonderen Vorteil hat, auch im stromlosen Zustand ihre Position zu halten.

3 Ausblick

Die gegenwärtigen Anstrengungen konzentrieren sich darauf, die Parameter des linearen Wanderwellenmotors experimentell genauer zu erfassen und zu verbessern. Die Verwendung eines Microcontrollers ermöglicht es, eine Vielzahl von Regelkonzepten für den optimalen Betriebspunkt des Motors zu testen, um vor allem auf fertigungstechnisch bedingte Abweichungen vom Idealfall der degenerierenden Moden bestmöglich reagieren zu können.

Daneben versprechen experimentelle Untersuchungen des Reibschlusses ein großes Potenzial, um sowohl Vorschubkraft als auch Geschwindigkeit des Motors zu steigern. Ergebnisse dieser Arbeiten werden im Vortrag präsentiert.

4 Literatur

- [1] Frösche, A.: Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors. IKFF Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 10, Dissertation 1992
- [2] Canon Inc.: EF Objektive für EOS-Kameras. Firmenprospekt der Fa. Canon Euro-Photo GmbH, Willich 1996
- [3] PI Ceramic: Piezoelektrischer Motor. DE 44 38 876 A1, 1995
- [4] Hermann, M.: Berechnung eines stabförmigen Wanderwellenmotors mit ANSYS. Festschrift anlässlich der Emeritierung von Herrn Prof. Jung. IKFF, Universität Stuttgart, 1995, S. 25-29
- [5] Hermann, M.: Entwicklung und Untersuchung piezoelektrisch erregter Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen. IKFF Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 14, Dissertation 1998
- [6] Hermann, M.; Schinköthe, W.; Haug, J.: Properties of a Piezoelectric Travelling Wave Motor Generating Direct Linear Motion. Actuator 98, Bremen 17. - 19. Juni 1998
- [7] Schinköthe, W.: Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften. 44. International Scientific Colloquium, Ilmenau 20.-23. 09.1999
- [8] Haug, J.; Schinköthe, W.: Linearer Wanderwellenmotor - Optimierung und Eigenschaften. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 2002, Ilmenau 23. - 26.09.2002

Neue Telefon- und Telefaxnummer:

Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402

Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356

Neue E-Mail-Adressen:

ikff@ikff.uni-stuttgart.de

linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de