

**Linearer Wanderwellenmotor -
Optimierung und Eigenschaften**

**Linear Travelling Wave Motor -
Optimization and Properties**

J. Haug, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zum

**47. Internationalen wissenschaftlichen
Kolloquium, Ilmenau**

23.-26. September 2002

J. Haug / W. Schinköthe

Linearer Wanderwellenmotor - Optimierung und Eigenschaften

Einleitung

In der Feinwerktechnik finden neben konventionellen Antrieben auch andere Wirkprinzipie Einsatz. Zur Realisierung sehr hoher Auflösungen bis in den Submikrometerbereich bieten sich piezoelektrische Stellelemente an. Ohne Schrittaddition sind deren Bewegungen jedoch stark eingegrenzt, linear beispielsweise trotz Hebelübersetzung auf wenige Millimeter. Eine Schrittaddition ist unter Nutzung des Inchworm-Prinzips oder auch unter Ausnutzung der Trägheit des Abtriebes realisierbar.

Andere Wege zur Realisierung kontinuierlicher Antriebe unter Nutzung des inversen piezoelektrischen Effektes geht man dagegen mit Wanderwellenmotoren. In deren Statoren werden resonante Schwingungen erregt und durch Reibschluss diese Schwingbewegungen auf den Abtrieb übertragen [1].

Neben den verschiedenen Bauformen rotatorischer Wanderwellenmotoren interessieren hier die Möglichkeiten der Umsetzung dieses innovativen, alternativen Antriebsprinzips auf lineare Bewegungen. Im Rahmen einer Entwicklung eines linearen Wanderwellenmotors wurde dieses Prinzip für einen Lineardirektantrieb modifiziert [2]. Neben der für Direktantriebe typischen hohen Dynamik weisen derartige Antriebe Selbsthemmung auf und können somit ihre Position im stromlosen Zustand halten.

Aufbau und Wirkungsweise des Motors

Mit Hilfe von Piezoelementen wird der Statorring eines Wanderwellenmotors in resonante Schwingungen versetzt, wobei zwei orthogonale Eigenformen gleichen Typs und gleicher Ordnung, die bei der selben Frequenz auftreten (degenerieren), zu einer fortlaufenden Wanderwelle überlagert werden. Dabei bewegen sich die Oberflächenpunkte des Stators, die mit dem Abtrieb reibschlüssig verbunden sind, auf elliptischen Trajektorien. Durch den Reibschluss entsteht am Läufer eine Abtriebsbewegung. Man verwendet meist Frequenzen im Bereich zwischen 20 und 100 kHz, weshalb Wanderwellenmotoren auch als Ultraschallmotoren bezeichnet werden.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Elemente des linearen Wanderwellenmotors. Die Ansterelektronik 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 angelegt, die am unteren geraden Abschnitt des Statorrings aufgeklebt sind. Durch den Quereffekt wird die Anregung auf den Stator übertragen, der mit den verwendeten orthogonalen Moden in Resonanz kommt. 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 Kugelumlaufl übertragen. Das mechanische Teilsystem befindet sich in einem steifen Rahmen, an dem Endschalter, Befestigungsmöglichkeiten, ein Wegmesssystem usw. vorgesehen sind.

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. Bei einem nicht idealen Motor, dessen Moden nicht vollständig degenerieren, liegt jedoch die optimale Betriebsfrequenz zwischen den beiden Resonanzfrequenzen der verwendeten Moden.

Bei bisherigen Prototypen des IKFF wurde ein Phase Locked Loop (PLL) verwendet, wie er aus der Nachrichtentechnik bekannt ist. Hierzu wurde ein Teil der Piezokeramik am Statorring nicht als Aktor sondern als Sensor beschaltet. 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.

Durch die Verwendung eines Microcontrollers ist der Entwickler frei in der Gestaltung des Reglers und hat vollen Einfluss auf die verwendeten Parameter. Es können ebenso Sensor-Signale von entsprechenden Piezo-Segmenten verwendet werden, um auf eine maximale Amplitude oder eine entsprechende Phasenlage zu regeln. Eine interessante Alternative hierzu stellt die Betrachtung der am Aktor anliegenden Spannung und der von ihm aufgenommenen Ströme durch eine Messung in der Leistungsstufe 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.

Für den optimierten Prototypen kommt daher ein Microcontroller zum Einsatz, der von beiden Anregungsberei-

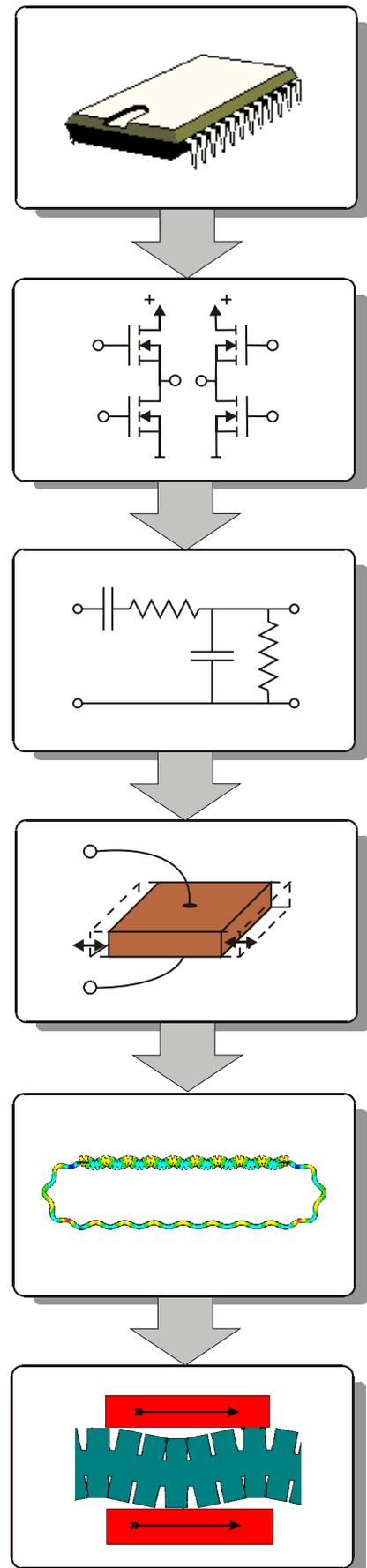


Abbildung 1: Überblick über den Aufbau des Gesamtsystems

chen 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 Abbildung 2 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 Anrege-Spannungen 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 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.

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.

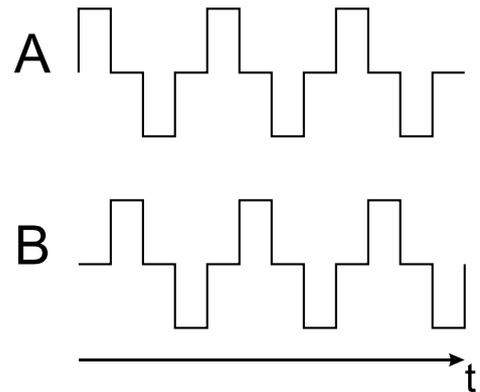


Abbildung 2: Elektrische Signale nach der Endstufe

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. Da die im Rechtecksignal der schaltenden Endstufen enthaltenen Oberschwingungen keinen Beitrag zur Anregung der Betriebsfrequenz leisten können, werden sie durch eine geeignete Filterung unterdrückt.

Das mechanische System tritt in der Umgebung seiner Resonanzfrequenz im elektrischen Ersatzschaltbild (Abbildung 3) 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 Abbildung 4 gezeigte Bandpass ergibt, der in der Betriebsfrequenz optimal filtert. Hierbei muss in der

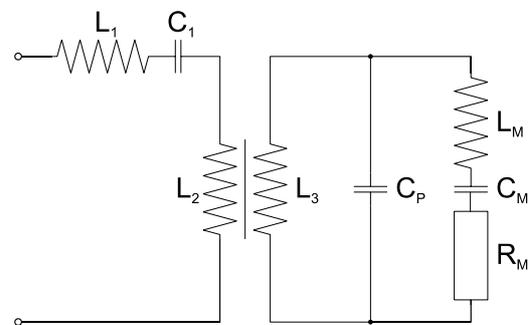


Abbildung 3: Ersatzschaltbild (1)

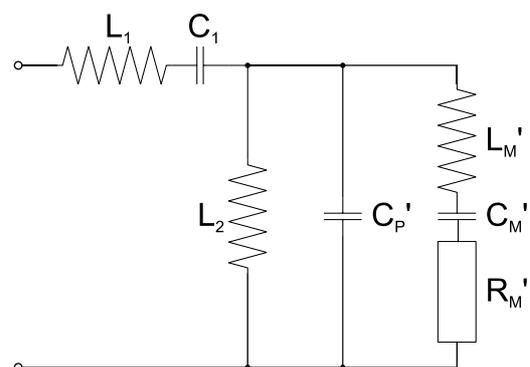


Abbildung 4: Ersatzschaltbild (2)

Praxis ein Kompromiss gewählt werden zwischen Unempfindlichkeit gegenüber Frequenzänderungen, Unterdrückung von Oberwellen und erreichter Spannungsamplitude.

Anbringung der Piezokeramik

Bei den meisten Wanderwellenmotoren werden die beiden verwendeten Moden durch zwei räumlich getrennte Piezobereiche mit einer viertel Wellenlänge Verschiebung zueinander angeregt.

Häufig sind dabei die jeweiligen Piezobereiche im Abstand einer halben Wellenlänge alternierend polarisiert [3], so dass eine einzelne Kontaktierung eines Piezos genügt, um eine wellenförmige Deformation zu erreichen (Abbildung 5).

Eine deutlich stärkere Anregung lässt sich erreichen, wenn die Piezokeramik in viertel Wellenlängen aufgeteilt wird, wobei die Segmente abwechselnd beiden Anregungsbereichen zugeordnet werden (Abbildung 6).

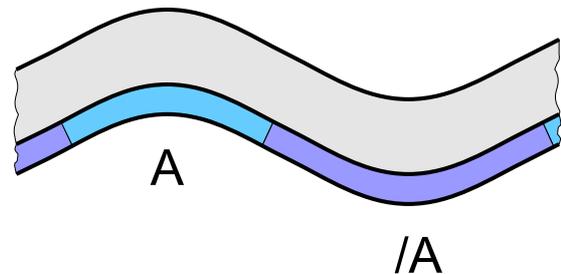


Abbildung 5: Konventionelle Anbringung der Piezokeramik

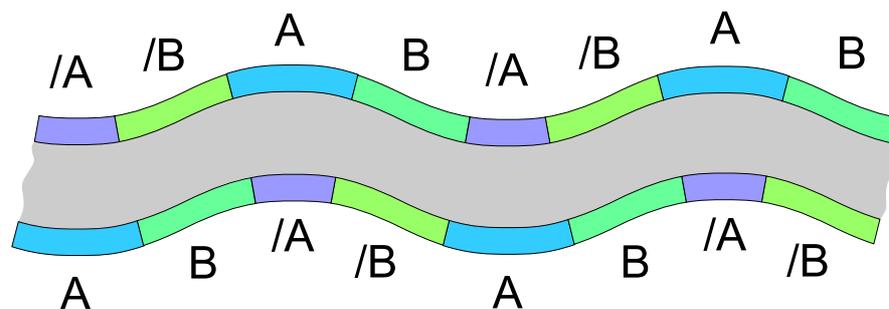


Abbildung 6: Neue Anbringung der Piezokeramik

Da bei linearen Wanderwellenmotoren außerdem die geraden Strecken für die Anregung und für den Bewegungsabgriff getrennt sind, können Piezos auf beiden Seiten des Stators angebracht werden, das aktive Material wird also nochmals verdoppelt. Bei dieser neuen Anordnung der Piezoelemente mit $\lambda/4$ -Teilung ergibt sich die Notwendigkeit, für jedes Segment eine eigene Kontaktierung vorzusehen. Thermische Schädigung der Piezokeramik beim Lötten wird durch die Verwendung von niedrig schmelzendem und gut fließendem Silberlot vermieden. Die Lötunkte sollten jeweils nur sehr klein sein und minimale Masse einbringen, da die Resonanzfrequenzen schon durch wenige Milligramm deutlich verschoben werden.

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

Insgesamt hat sich der Übertragungsfaktor von rund $0,02 \mu\text{m}/\text{V}$ [4] auf ca. $0,05 \mu\text{m}/\text{V}$ mehr als verdoppelt, d.h. bei einer anregenden Spannung von beispielsweise 100 V erreicht der Stator jetzt eine Schwingungsamplitude von $5 \mu\text{m}$ anstatt zuvor $2 \mu\text{m}$.

Statorring

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

auftritt. Um eine geeignete Geometrie zu finden, werden einzelne Geometrieparameter schrittweise verändert und in FEM-Analysen die Eigenformen und -frequenzen bestimmt. Der Qualität des FEM-Modells kommt dabei entscheidende Bedeutung zu. Problemstellen sind insbesondere die Klebeschichten zwischen Piezokeramik und Metall und die Anordnung der Piezosegmente. In weiteren Analysen wurde außerdem untersucht, inwieweit die durch Lötunkte aufgebrauchten zusätzlichen Massen die Resonanzfrequenzen verschieben. Dabei wurde festgestellt, dass der Einfluss dieser Zusatzmassen im

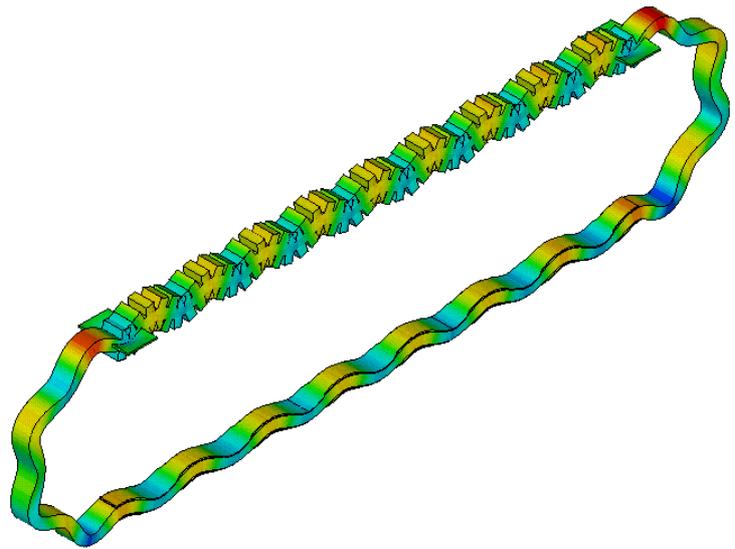


Abbildung 7: Momentaufnahme der Wanderwelle

Bereich bis 1 mg völlig unproblematisch ist, bis etwa 5 mg ist er noch akzeptabel. Bei über 5 mg besteht die Gefahr, dass die beiden Resonanzfrequenzen nicht im selben Maße verschoben werden und die verwendeten Moden nicht mehr degenerieren.

Abbildung 7 zeigt in stark überhöhter Darstellung die Momentaufnahme der Wanderwelle in der FEM-Simulation. Der Statorring wird mit zwei kurzen Membranen an den Enden des oberen geraden Abschnitts am Rahmen befestigt, so dass die Anordnung gegenüber den entstehenden Vorschubkräften sehr steif, gegenüber der umlaufenden Biegewelle jedoch weich ist.

Reibbelag und Läufer

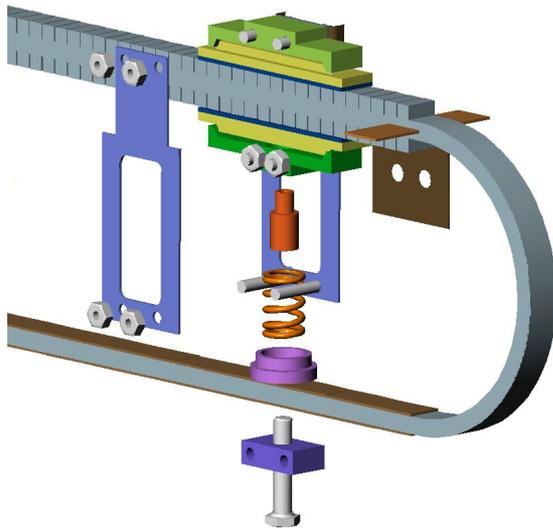


Abbildung 8: Läufer am Statorring

Der Antrieb eines Wanderwellenmotors erfolgt reibschlüssig (Abbildung 8). Deshalb muss besonderer Wert auf die Gestaltung des Läufers und die Auswahl des Reibbelages gelegt werden. 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 betrachtet, wie sich der Druck unter Aluminium-Plättchen verschiedener Geometrie mit Kunststoff-Belägen verschiedener Dicke und Steifigkeit verteilt.

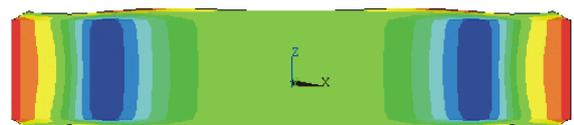


Abbildung 9: Druckverteilung unter dem Läufer (Beispiel)

Nach Optimierung konnte eine Geometrie gefunden werden, die für verschiedene realistische Dicken und Steifigkeiten von Reibbelägen relativ gleichmäßige Flächenpressungen ermöglicht, wobei an den beiden Enden des Läufers die Pressung jeweils minimal wird, so dass beim

Verschieben des Läufers ein sanftes Eingreifen stattfinden kann. Gleichzeitig ist es gelungen, die bewegte Masse deutlich zu reduzieren. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis in der FEM-Simulation. Die roten Bereiche an den Kanten werden sich von der Kontaktfläche abheben, im gelben Bereich ist die Pressung sehr gering. Die Maxima sind blau dargestellt. Experimentelle Untersuchungen des Abtriebsverhaltens mit verschiedensten Reibbelägen sind Gegenstand laufender Arbeiten.

Abtrieb

Damit vom Abtrieb her keine störenden Kräfte oder Momente auf den Läufer zurück wirken, wird er über Membranen spielfrei an eine reibungsarme Kugelumlauflührung gekoppelt. Am Schlitten dieser Führung kann dann die Vorschubkraft abgegriffen werden. 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 den besonderen Vorteil hat, in stromlosem Zustand ihre Position zu halten.

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 auf vor allem fertigungstechnisch bedingte Abweichungen vom Idealfall mit degenerierenden Moden bestmöglich zu reagieren. Daneben versprechen experimentelle Untersuchungen des reibschlüssigen Abtriebs ein großes Potenzial, um sowohl Vorschubkraft als auch Geschwindigkeit des Motors zu steigern. Erste Ergebnisse dieser Arbeiten werden im Vortrag präsentiert werden.

Literaturhinweise:

- [1] Schinköthe, W.: Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften. 44. International Scientific Colloquium, 20. - 23. September 1999, Ilmenau.
- [2] Hermann, Martin: Entwicklung und Untersuchung piezoelektrisch erregter Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen. IKFF Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 14, Dissertation 1998.
- [3] Frösche, Axel: Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors. IKFF Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 10, Dissertation 1992.
- [4] Hermann, M.; Schinköthe, W.; Haug, J.: Properties of a Piezoelectric Travelling Wave Motor Generating Direct Linear Motion. Actuator 98, 17. - 19. Juni 1998, Bremen.

Autoren:

Dipl.-Ing. Jens Haug
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe
Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70550 Stuttgart
Tel.: 0711 / 685-6402
Fax: 0711 / 685-6356
E-Mail: ikff@ikff.uni-stuttgart.de
www.uni-stuttgart.de/ikff/

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