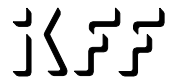


Veröffentlichungen am IKFF



Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften

W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zu

**44. Internationales
Wissenschaftliches Kolloquium**

20. - 23. September 1999
Ilmenau

© 1999 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

W. Schinköthe

Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften

Einleitung

In der Feinwerktechnik finden neben konventionellen Antrieben auch andere Wirkprinzipie Einsatz. Interessante Entwicklungen der jüngsten Zeit stellen Motoren dar, die piezoelektrisch generierte Wanderwellen zur Bewegungserzeugung nutzen. Erste kommerziell verfügbare Baureihen rotatorischer Motoren machen diese innovativen Antriebe insbesondere bei Forderungen nach hohem Drehmoment bei niedriger Drehzahl interessant, sie können als rotatorische Direktantriebe genutzt werden. Hinzu kommt die Eigenschaft der Selbsthemmung und damit das stromlose Halten einer Position.

1 Funktionsweise von Wanderwellenmotoren

In den Statoren von Wanderwellenmotoren werden resonante Schwingungen erregt, zu fortlaufenden Wellen überlagert und durch Reibschluß Bewegungen auf den Abtrieb übertragen. Dies ermöglicht die Realisierung kontinuierlich arbeitender Motoren. Man bezeichnet sie auch als Ultraschallmotoren, da Resonanzschwingungen bei Frequenzen zwischen 20 und 100 kHz, also im Ultraschallbereich, erregt werden.

Ein Charakteristikum der Wanderwellenantriebe besteht darin, daß die schwingenden Oberflächenpunkte, die in Kontakt mit dem Abtrieb stehen, sich auf elliptischen Trajektorien bewegen. Diese elliptischen Trajektorien erzielt man, indem zwei Eigenformen, die bei derselben Frequenz auftreten (degenerieren), im Schwinger überlagert werden. Die überlagerten Eigenformen sind stets orthogonale Eigenformen vom gleichen Typ und gleicher Ordnung. Durch Anregung der beiden Eigenformen mit einer räumlichen und zeitlichen Phasenverschiebung entsteht infolge der Überlagerung im Stator eine Welle [1]. Diese Welle beschreibt eine umlaufende Biegewelle, eine umlaufende Biegung oder eine Dehnungswelle. Der Kontakt zwischen Stator und Rotor bleibt ständig erhalten, d.h. zu jedem Zeitpunkt sind gleichviele Kontaktpunkte im Eingriff.

2 Motoren mit umlaufender Biegewelle

Erste marktreife Prototypen von Wanderwellenmotoren basierten auf Motoren mit Biegewellen [1], Abb. 1. Der Motor besteht aus Gehäuseteilen (1, 12), Lager-elementen (8, 9, 10, 11), der Abtriebswelle (7), dem Stator (3) und dem

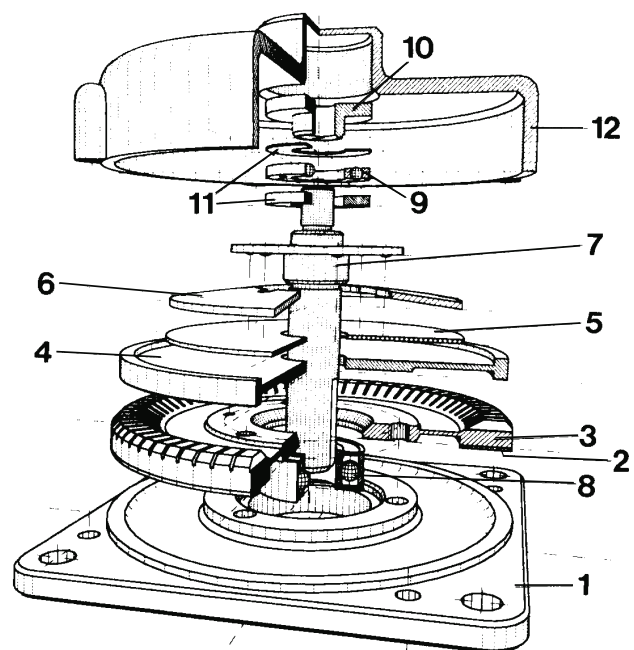


Abb.1: Explosionsdarstellung des Shinsei-Motors USR-60 [1]

Rotor (4). Auf der Statorunterseite ist die Piezokeramik (2) zur Anregung der Wanderwelle aufgeklebt. Der Stator selbst ist an der am Rotor anliegenden Seite durch Einschnitte biegeweich gestaltet. Der Rotor trägt auf der Unterseite eine Reibschicht und wird über eine Gummischeibe (5) mit einer Tellerfedern (6) auf die Oberseite des Stator unter Vorspannung angedrückt.

Die Überlagerung zweier stehender Wellen erzeugt im Stator die gewünschte wandernde Biegewelle. Die Erregung erfolgt typischerweise mit einer Zwei-Phasen-Ansteuerung zweier Anregungsbereiche unter Einhaltung einer räumlichen Phasenbedingung von $x_0 = \lambda/4$ und einer zeitlichen Phasenbedingung von $\Phi_0 = \pi/2$. Abb. 2 zeigt die beiden Anregungsbereiche und die von der Wellenlänge abhängige Aufteilung und Polarisation der Piezokeramik für den obigen Shinseimotor. Die räumliche Phasenbedingung wird durch einen Versatz der Anregungsbereiche um $\lambda/4$ realisiert, z.B. durch Einbringung eines Sensorfeldes. Durch Änderung des Vorzeichens der Phasenverschiebung kann die Drehrichtung umgeschaltet werden. Eine Momentaufnahme der umlaufenden Biegewelle zeigt Abb. 3.

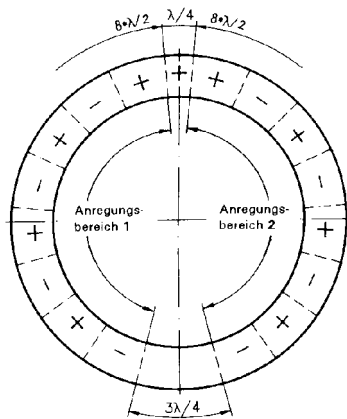


Abb. 2: Polarisierung der Piezokeramik des Shinsei-Motors

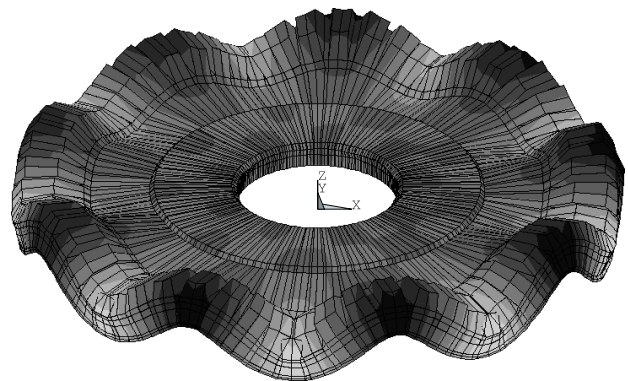


Abb. 3: Momentaufnahme der Wanderwelle (stark überhöht)

Die Oberflächenpunkte des Stators durchlaufen elliptische Trajektorien. Abb. 4 zeigt solche für Kontaktpunkte zwischen Stator und Rotor. Diese Trajektorien besitzen durch die eingebrachten Einschnitte eine ausreichend große Komponente in Abtriebsrichtung. Ohne Einschnitte hätten die Trajektorien eine elliptische Form mit senkrechter großer Halbachse.

Eine interessante Variante dieses Motors stellt auch ein Hohläufermotor dar, um beispielsweise eine Optik aufnehmen zu können [2].

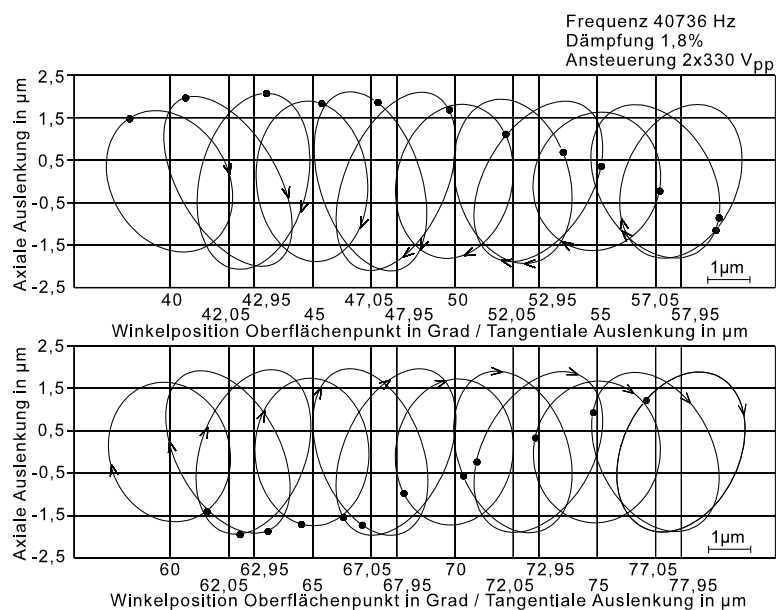


Abb. 4: Trajektorien von Punkten in der Kontaktfläche des Stators (ca. eine Wellenlänge dargestellt), [7]

3 Motoren mit umlaufender Biegung

Eine zweite Bauform bilden Motoren mit Zylindergeometrie bei einem Länge/Durchmesser-Verhältnis deutlich größer eins. Aufbau und Funktion sind in [3] und [7] beschrieben. Abb. 5 zeigt eine Schnittdarstellung, Abb. 6 einen realen Aufbau. Die entscheidenden Baugruppen sind der Stator mit seinen Einzelteilen (1, 2, 3, 7, 8) sowie der Rotor (4, 5) mit dem Abtriebszahnrad (10). Am Flansch (12) wird der Motor am Gehäuse befestigt, so daß der Stator über die Achse (8) flexibel aufgehängt ist und unbehindert schwingen kann. Die Schwingungsanregung erfolgt durch die Piezokeramikscheiben (2). Kupferscheiben (7) dienen zur elektrischen Kontaktierung. Über eine Feder (9) wird der Rotor auf den Stator gedrückt. Das Lager (11) stützt den Rotor ab.

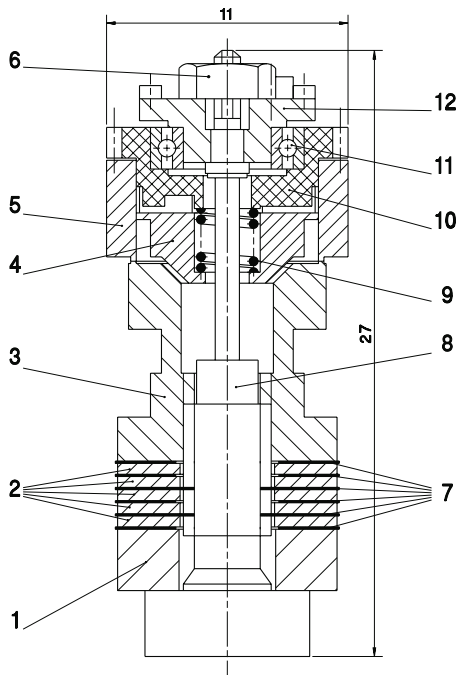


Abb. 5: Schnittdarstellung eines stabförmigen Wanderwellenmotors [3]

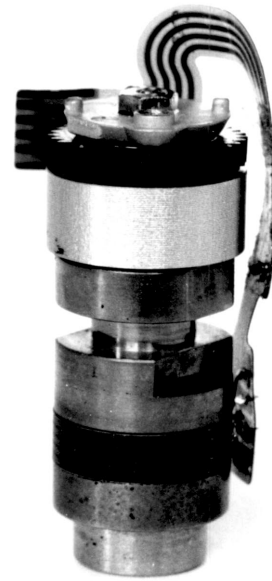


Abb. 6: Stabförmiger Wanderwellenmotor aus einem Objektiv von Canon

An der schmalen kreisringförmigen Reibfläche zwischen Stator (3) und Rotor (5) findet die Erzeugung der Drehbewegung statt. Die Auslenkungen verlaufen bei den degenerierten Biegeeigenformen in einer Ebene durch die Mittelachse des Stators. Für die beiden überlagerten Eigenformen stehen diese Ebenen senkrecht aufeinander, woraus ihre Orthogonalität folgt. Die Überlagerung der beiden orthogonalen Eigenformen, die ebenfalls mit einer Zwei-Phasen-Ansteuerung bei Einhaltung einer räumlichen und einer zeitlichen Phasenbedingung ($x_0 = \lambda/4$, $\Phi_0 = \pi/2$) erregt werden, bewirkt das Umlaufen der Biegung. Abb. 7 zeigt Momentaufnahmen der Wanderwelle. Ein Taumeln der Kontaktfläche mit dem Auflagepunkt zum Rotor wird deutlich.

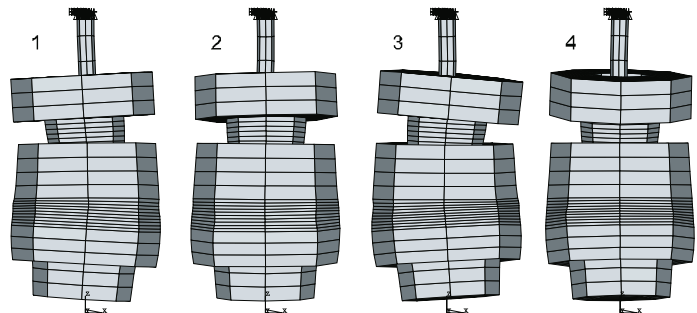


Abb. 7: Momentaufnahmen für vier aufeinanderfolgende Zeitpunkte (stark überhöht)

4 Motoren mit Dehnungswelle

Die dritte Bauform nutzt Dehnungseigenformen eines Hohlzylinders. Während die zuvor erläuterten Bauformen Verbundschwinger aus Piezokeramik und Metall beinhalten, besteht hier der Stator nur aus Piezokeramik, Abb. 8. Es können Motoren mit sehr kleinen Durchmessern (ab ca. 3 mm) aber auch mit Durchmessern bis ca. 100 mm sowie Hohlläufer realisiert werden [4].

Der Stator (Piezokeramikzylinder) trägt an der oberen Stirnfläche eine Reibschicht. Damit das untere Befestigungsteil das Reaktionsmoment aufnehmen kann, wird zwischen den beiden Teilen eine elastische Schicht mit hohem Reibungskoeffizienten angebracht. Die Lagerung des Rotors (obere Scheibe in Abb. 8) kann über die Abtriebsachse erfolgen. Sie muß gleichzeitig die axiale Anpreßkraft zwischen Rotor und Stator und damit auch die Reaktionskraft zwischen Stator und Befestigungsteil aufbringen.

Die Erzeugung der wandernden Dehnungswelle erfolgt bei diesem konkreten Motor durch Überlagerung von drei stehenden Wellen. Ähnlich einem Drehfeldmotor müssen drei zeitlich um $\Phi_0 = 2\pi/3$ bzw. $\Phi_1 = 4\pi/3$ phasenverschobene Ansteuersignale bereitgestellt werden. Dazu sind drei Anregungsbereiche für die Erregung der drei stehenden Wellen räumlich mit einer Phasenverschiebung von $x_0 = 2\lambda/3$ bzw. $x_1 = 4\lambda/3$ anzuordnen. Durch Vertauschen von zwei Ansteuersignalen wird die Drehrichtung umgeschaltet.

Eine Momentaufnahme der Dehnungswelle enthält Abb. 9. Die Oberflächenpunkte durchlaufen elliptische Trajektorien in der axial-tangentialen Ebene mit tangentialen Auslenkungen zwischen 0,4 und 1,5 μm .

Eine Übersicht der realisierbaren Parameter kommerziell eingesetzter rotatorischer Wanderwellenmotoren zeigt Abb. 10.

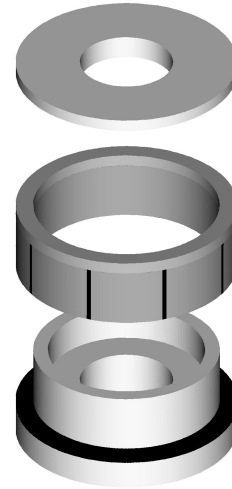


Abb. 8: Prinzipieller Aufbau eines Motors mit Dehnungswelle

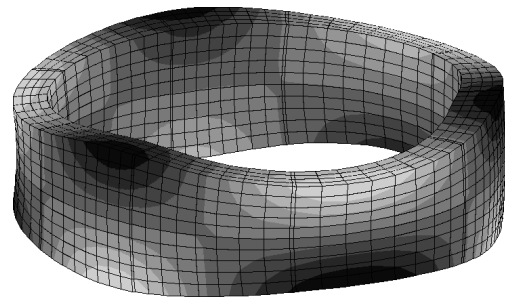


Abb. 9: Momentaufnahme der Dehnungswelle (stark überhöht)

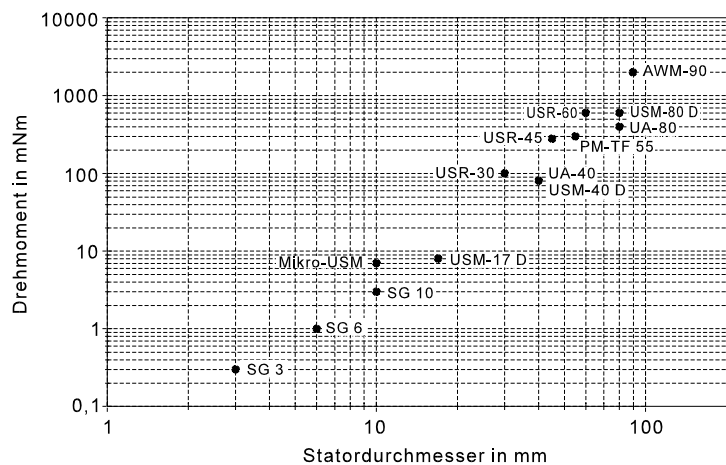


Abb. 10: Drehmoment in Abhängigkeit des Statordurchmessers, SG-, PM-Typen von PI Ceramic, UA von Canon, USM von Panasonic, USR von Shinsei

5 Lineare Wanderwellenmotoren

Bisher wurden Bauformen rotatorischer Motoren besprochen. Es ist naheliegend, die Umsetzung des Prinzipes auf lineare Bewegungen zu untersuchen, [7] bis [10]. Entgegen den rotatorischen Motoren ist es auf einem linearen Stator jedoch nicht ohne weiteres möglich, eine Wanderwelle zu erzeugen, da an den Enden Reflexionen auftreten, die sich letztlich zu einer stehenden Welle überlagern. Lineare Wanderwellenmotoren benötigen deshalb ebenfalls einen geschlossenen Wellenleiter.

Den am IKFF realisierten Motor zeigt Abb. 11. Er ist an die rotatorische Bauform mit umlaufender Biege- welle angelehnt. Der Ringstator besteht aus zwei geraden Abschnitten und zwei Halbkreisbögen. Die Innenseite des unteren Abschnittes trägt die Piezokeramik. Die Aufhängung des Stators erfolgt über zwei Membranen entlang beider Seiten des unteren

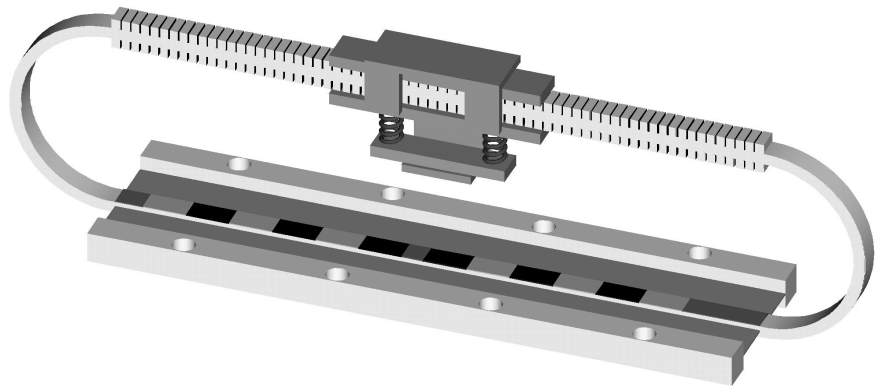


Abb. 11: Linearer Wanderwellenmotor mit Ringstator [7]

geraden Abschnittes, so daß der Ring im Raum ortsfest gebunden ist, die Wanderwelle jedoch ungestört umlaufen kann. Auf dem oberen geraden Abschnitt sitzt der Läufer (Bewegungsabgriff). Zur Vergrößerung der Bewegungskomponente in Antriebsrichtung trägt er wieder Einschnitte.

Diese Anordnung besitzt einige Vorteile. Die geringe Läufermasse sichert eine hohe Dynamik. Der passive Läufer benötigt keine Zuleitungen. Der Läufer kann umfangreich gestaltet werden, um Ringdeformationen durch die Anpressung des Läufers zu vermeiden. Dies sichert gleichmäßigen Kontakt und durch die zwei Kontaktflächen eine höhere Motorkraft.

Die wandernde Biege- welle entsteht wieder aus den zwei stehenden Wellen mit den bekannten Phasenbedingungen ($x_0 = \lambda/4$, $\Phi_0 = \pi/2$). Durch Vertauschen

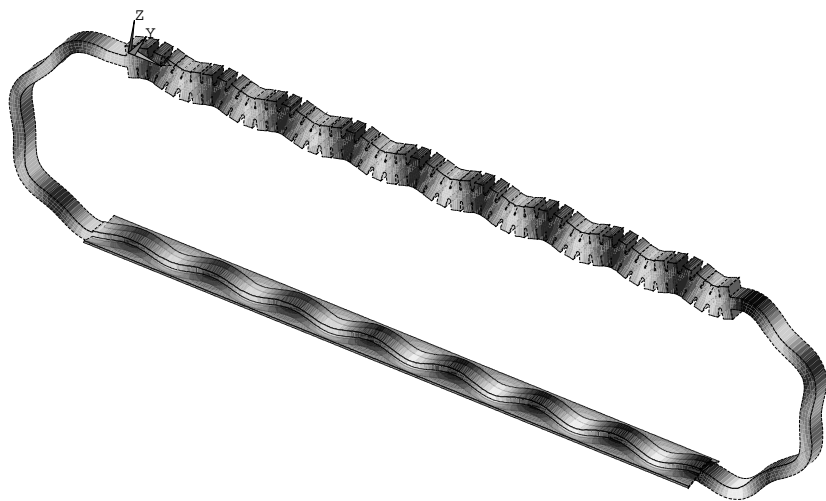


Abb. 12: Momentaufnahme der Biege- welle im Ringstator des linearen Wanderwellenmotors (stark überhöht) [7]

der beiden Ansteuersignale kann die Bewegungsrichtung umgeschaltet werden. Eine Überlagerung zweier stehender Biegewellen erfordert die Existenz eines orthogonalen Eigenformpaares, welches idealerweise degeneriert. Für die Geometrie des Ringstators ist dies im Gegensatz zu den rotationssymmetrischen Motoren nicht selbstverständlich. In [7] wurde nachgewiesen, daß auch für den Ringstator orthogonale Biegeeigenformen existieren, die für bestimmte Geometrie-Verhältnisse auch dieselbe Eigenfrequenz besitzen. Eine Simulation für einen Ringstator mit optimierter Geometrie bestätigt die Anregung einer ideale Wanderwelle. Eine Momentaufnahme der Wanderwelle veranschaulicht Abb. 12. Es wurden mehrere Prototypen des linearen Wanderwellenmotors mit Ringstator realisiert, welche die Funktionsweise dieses Motorkonzeptes in der Praxis demonstrieren, Abb. 13.

Schlußfolgerungen

Wanderwellenmotoren stehen als rotatorische Motoren schon heute in verschiedensten Bauformen zur Verfügung. Sie sind als langsam laufende Direktantriebe ohne Getriebe einsetzbar. Vorteilhaft ist die Selbsthemmung. Lineare Wanderwellenmotoren stehen am Anfang ihrer Entwicklung. Da sie den Wellenleiter nicht vollständig umgreifen, sind ihre Parameter noch nicht zufriedenstellend.

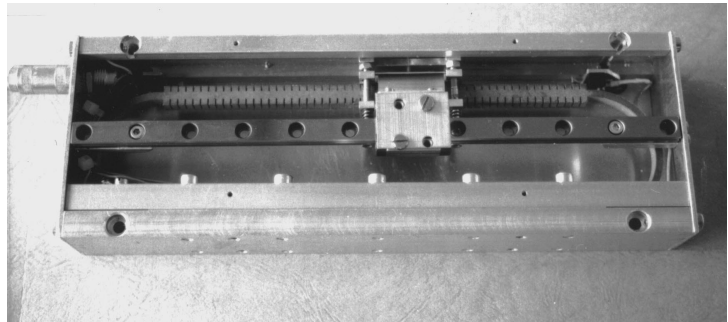


Abb. 13: Prototyp einer Achse mit linearem Wanderwellenmotor

Literatur bzw. Quellenhinweise:

- [1] Fröschle, A.: Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 10, 1992.
- [2] Canon Inc.: EF Objektive für EOS-Kameras. Firmenprospekt der Fa. Canon Euro-Photo GmbH, Willich 1996.
- [3] Hermann, M.: Berechnung eines stabförmigen Wanderwellenmotors mit ANSYS. Festschrift anlässlich der Emeritierung von Herrn Prof. Jung. IKFF, Universität Stuttgart, 1995, S. 25-29.
- [4] PI Ceramic: Piezoelektrischer Motor. DE 44 38 876 A1, 1995.
- [5] Herzog, B.: Entwicklungsgrundlagen für modulare Ultraschallantriebe - Meßtechnik, Regelungsprinzipien, Modelle. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 11, 1993.
- [6] Schinköthe, W.; Hermann, M.; Voss, M.: Lineardirektantriebe erschließen neue Anwendungen. 41. IWK der TU Ilmenau 1996, Ilmenau 23.-26.09.96, Reihe Mechatronik, Tagungsband 2, S. 51 - 56.
- [7] Hermann, M.: Entwicklung und Untersuchung piezoelektrisch erregter Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 14, 1998.
- [8] Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelektrische Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen, Tagung Innovative Kleinantriebe, Mainz 09./10. 05.96, VDI-Berichte 1269, S. 301-314.
- [9] Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelectric Travelling Wave Motors Generating Direct Linear Motion. Conference Proceedings, Actuator '96, Bremen 26.- 28.06.96, Conference Proceedings, S. 200-203.
- [10] Hermann, M.; Schinköthe, W.; Haug, J.: Properties of a Piezoelectric Travelling Wave Motor Generating Direct Linear Motion. Actuator '98, Bremen 17.- 19.06.98, Conference Proceedings, S. 238-241.

Autorenangaben:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe
 Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
 Tel.: 0711/6856411
 Fax.: 0711/6856356
 E-mail: schinkoethe@ikff.uni-stuttgart.de

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