



Wanderwellenmotor - alternative Antriebe in der Feinwerktechnik

W. Schinköthe, M. Hermann (IKFF)

Beitrag zur

Drives 98

Nürnberg 24. - 28. November 1998

© 1999 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Wanderwellenmotoren - alternative Antriebe in der Feinwerktechnik

Dr.-Ing. Martin Hermann, Manfred Föhrenbach GmbH, Löffingen-Unadingen
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

1. Einleitung

In der Feinwerktechnik finden neben den konventionellen elektromechanischen oder elektrodynamischen Antrieben zunehmend auch andere Wirkprinzipie in Antriebssystemen Einsatz. Zur Realisierung sehr hoher Auflösungen bis in den Submikrometerbereich hinein bieten sich bekanntermaßen piezoelektrische Stellelemente an. Sie nutzen den inversen piezoelektrischen Effekt zur Bewegungserzeugung. Ohne Schrittaddition sind deren Bewegungsbereiche 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, anwendungsreife Lösungen sind jedoch bisher noch selten [1].

Interessante Entwicklungen der jüngsten Zeit stellen Motoren dar, die piezoelektrisch generierte Wanderwellen zur Bewegungserzeugung nutzen. Wanderwellenmotoren besitzen vielversprechende Eigenschaften, wie hohes Antriebsmoment bei kleiner Baugröße, kleine Anlaufzeitkonstanten und ein großes Haltemoment im stromlosen Zustand. Erste kommerziell verfügbare Baureihen rotatorischer Motoren machen diese innovativen, alternativen Antriebe insbesondere bei Forderungen nach hohem Drehmoment bei niedriger Drehzahl interessant, sie können also als rotatorische Direktantriebe ohne Getriebe genutzt werden. Hinzu kommt die Eigenschaft der Selbsthemmung und damit das sichere Halten einer Position im stromlosen Zustand.

2. Funktionsweise von Wanderwellenmotoren

In den Statoren von Wanderwellenmotoren werden resonante Schwingungen erregt, zu fortlaufenden Wellen überlagert und durch Reibschluß diese Schwingbewegungen auf den Abtrieb übertragen. Dies ermöglicht die Realisierung kontinuierlich arbeitenden 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 (diese Eigenformen degenerieren also), im Schwinger überlagert werden. Die überlagerten Eigenformen sind stets orthogonale Eigenformen vom gleichen Typ und gleicher Ordnung, die aufgrund der

Rotationssymmetrie des Stators degenerieren. Durch Anregung der beiden Eigenformen unter Berücksichtigung einer räumlichen und zeitlichen Phasenbedingung entsteht infolge der Überlagerung im Stator eine Welle, d.h. eine räumliche und zeitliche Zustandsänderung des Kontinuums [2]. Diese Welle beschreibt entweder eine umlaufende Biegewelle (ursprüngliche Bauform), eine umlaufende Biegung oder eine Dehnungswelle. Die verschiedenen darauf basierenden Motorbauformen werden im Folgenden erläutert.

Der Kontakt zwischen Stator und Rotor bleibt als ein weiteres Charakteristikum ständig erhalten, d.h. es sind zu jedem Zeitpunkt gleichviele Kontaktpunkte über dem Umfang verteilt im Eingriff. Die Anzahl der Berührungspunkte entspricht der Ordnung der Eigenformen. Mit dem Fortschreiten der Wanderwelle laufen die Berührungspunkte auf dem Umfang um.

3. Bauformen von Wanderwellenmotoren

3.1 Motoren mit umlaufender Biegewelle

Erste marktreife Prototypen eines Wanderwellenmotors basierten auf dem 1982 von T. Sashida erfundenen Motor mit Biegewelle. Diese lösten großes Interesse an der neuen Technologie aus, zunächst in Japan und anschließend auch in Europa und den USA, besonders seitens der Automobilindustrie. Dieser Motor war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen; es wurden theoretische Grundlagen erarbeitet und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. In [2] ist z.B. die Funktionsweise des Motors beschrieben. Bild 1 zeigt den für alle Wanderwellenmotoren kennzeichnend einfachen Aufbau. Neben den Gehäusebauteilen (1), (12), den Lagerelementen (8), (9), (10), (11) und der Abtriebswelle (7) gibt es zwei wesentliche Baugruppen: den Stator (3) und den Rotor (4). Auf der Statorunterseite ist die Piezokeramikscheibe (2) zur Anregung der Wanderwelle aufgeklebt. Der Stator selbst ist an der am Rotor anliegenden Seite durch eine 'Verzahnung' biegeweich gestaltet. Der Rotor trägt auf der Unterseite eine Reibschicht und wird mit der Tellerfeder (6) auf die Oberseite des Stator unter Vorspannung angedrückt.

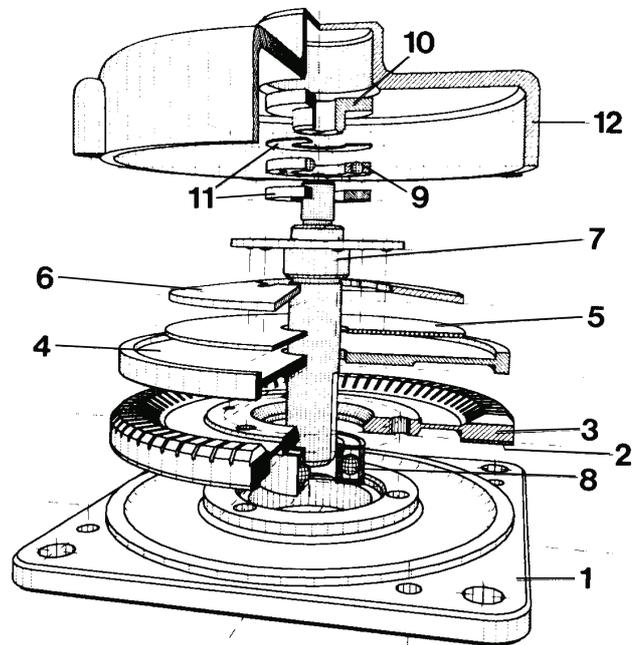


Bild 1: Explosionsdarstellung des Shinsei-Motors USR-60 [2]

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 $\Phi_0 = \pi/2$. Bild 2 zeigt die beiden Anregungsbereiche und die von der Wellenlängen abhängige Aufteilung und Polarisation der Piezokeramik für den oben abgebildeten Shinsei-Motor. Die räumliche Phasenbedingung wird durch einen Versatz der Anregungsbereiche um $\lambda/4$ realisiert, z.B. durch Einbringung eines Sensorfeldes in die Piezokeramik.

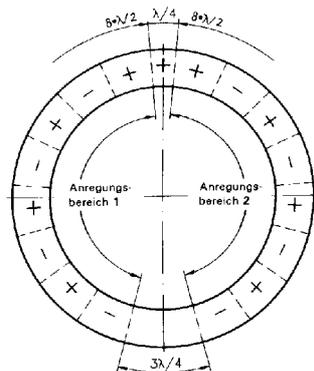


Bild 2: Polarisierung der Piezokeramikscheibe des Shinsei-Motors

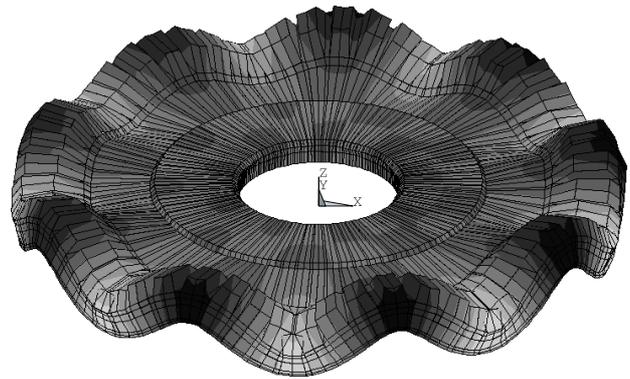


Bild 3: Momentaufnahme der Wanderwelle im Stator (stark überhöht)

Durch Änderung des Vorzeichens der zeitlichen Phasenverschiebung kann die Ausbreitungsrichtung der Wanderwelle und damit die Drehrichtung des Motors umgeschaltet werden. Eine Momentaufnahme der umlaufenden Biegewelle zeigt Bild 3. Die Oberflächenpunkte des Stators durchlaufen während einer Schwingungsperiode eine elliptische Trajektorie. Bild 4 zeigt Trajektorien von Statorpunkten im Zahngrund. Horizontal in Abtriebsrichtung sind diese noch relativ schmal.

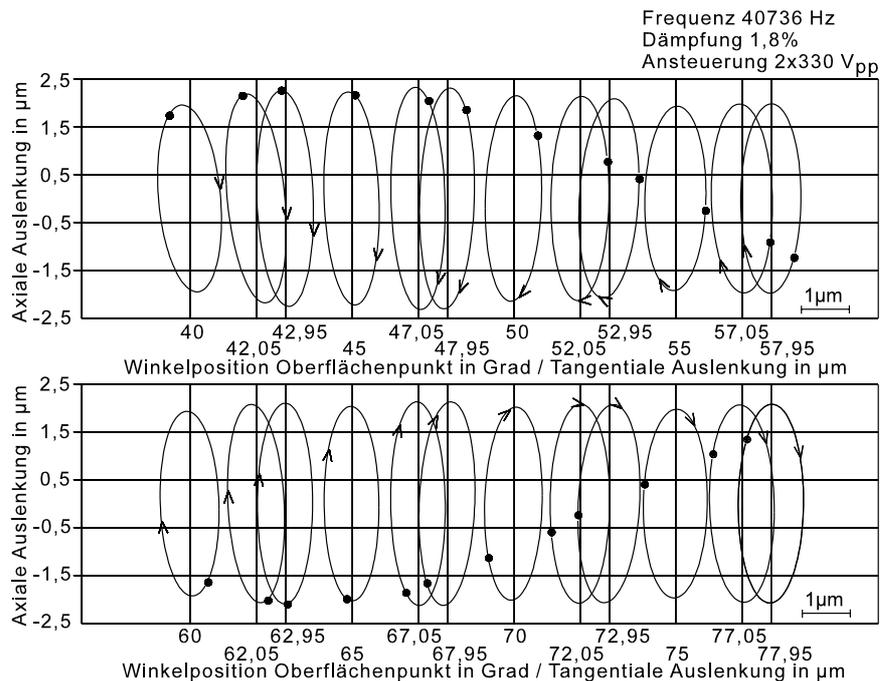


Bild 4: Trajektorien von Statorpunkten in Höhe des Zahngrundes (ca. eine Wellenlänge dargestellt), [8]

An den Kontaktpunkten des Stators verlaufen diese Trajektorien durch die aufgebraute Verzahnung jedoch deutlich flacher, besitzen also eine größere Komponente in Abtriebsrichtung, Bild 5.

Der Rotor wird entsprechend der Anzahl der Wellenlängen auf dem Umfang (Ordnung der Biegeeigenform) gleichzeitig an mehreren Berührungspunkten gestützt, wobei die Kontaktpunkte mit dem Fortschreiten der Biegewelle auf dem Umfang wandern.

Eine interessante Variante dieser Bauform stellt ein Aufbau als Hohläufer (Bild 6) dar, um beispielsweise in der Mitte des Motors ein optisches Linsensystem aufzunehmen [3].

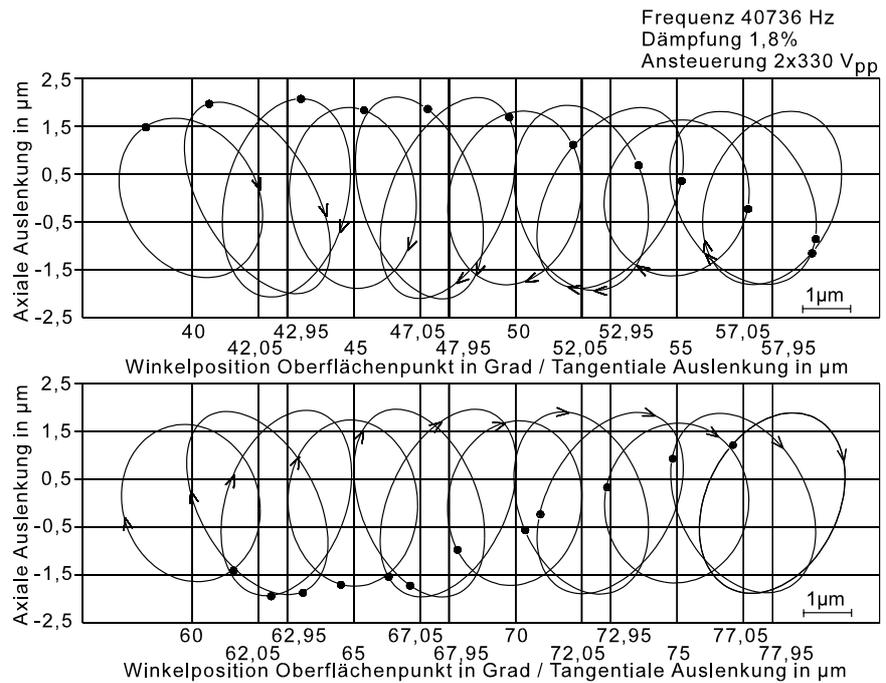


Bild 5: Trajektorien von Punkten in der Kontaktfläche des Stators (ca. eine Wellenlänge dargestellt), [8]

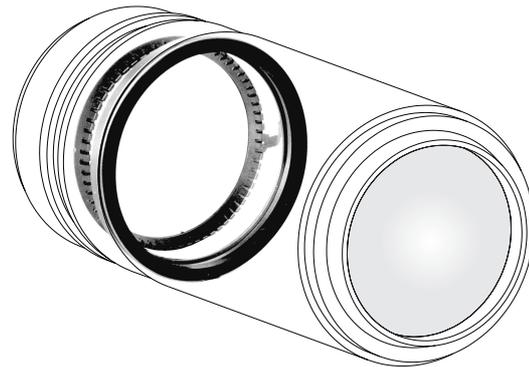


Bild 6: Anordnung eines Wanderwellenmotors mit Biegewelle (Hohläufermotor) in einem Objektiv nach [3] (links: Statorring; rechts Rotor)

3.2 Motoren mit umlaufender Biegung

Eine zweite wichtige Bauform bilden Wanderwellenmotoren mit Zylindergeometrie bei einem Länge/Durchmesser-Verhältnis deutlich größer eins. Aufbau und Funktion eines derartigen Motors sind in [4] und [8] beschrieben. Bild 7 zeigt eine Schnittdarstellung des Motors, Bild 8 einen realen Aufbau. Die entscheidenden Baugruppen sind wiederum der Stator mit den Einzelteilen (1), (2), (3), (7) und (8) sowie der Rotor bestehend aus den Einzelteilen (4), (5) und dem Abtriebszahnrad (10). An dem 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), die mittels einer Verschraubung zwischen dem Schwinger (3) und der Achse (8) vorgespannt werden. Die Kupferscheiben (7) dienen zur elektrischen Kontaktierung. Über die Schraubenfeder (9) wird der Rotor auf den Stator angedrückt. Das Kugellager (11) schließt den Kraftschluß zum Gehäuse hin.

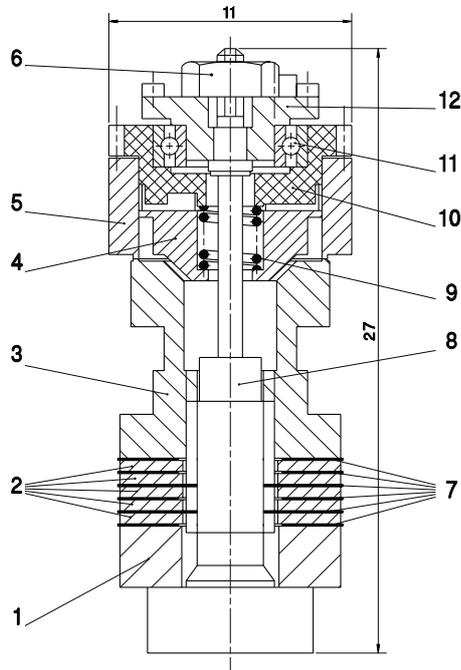


Bild 7: Schnittdarstellung eines stabförmigen Wanderwellenmotors [4]



Bild 8: Stabförmiger Wanderwellenmotor aus einem Objektiv von Canon

An der schmalen kreisringförmigen Reibfläche zwischen Stator (3) und Rotor (5) findet durch den Reibschluß die Erzeugung der Drehbewegung des Rotors 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. Durch Überlagerung der beiden orthogonalen Eigenformen, die ebenfalls mit einer Zwei-Phasen-Ansteuerung bei Einhaltung einer räumlichen und einer zeitlichen Phasenbedingung ($x_0 = \lambda/4$, $\Phi_0 = \pi/2$) im Stator erregt werden, bewirkt man das Umlaufen der Biegung.

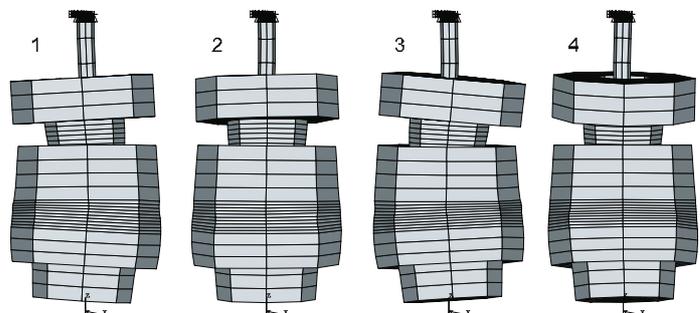


Bild 9: Momentaufnahmen der Wanderwelle für vier aufeinanderfolgende Zeitpunkte einer Schwingungsperiode (stark überhöht)

Bild 9 zeigt vier aufeinanderfolgende Momentaufnahmen der Wanderwelle. Die Taumelbewegung der Kontaktfläche zum Rotor wird deutlich. Der Kontakt zwischen

Stator und Rotor konzentriert sich bei diesem Motortyp an einer Stelle auf dem Umfang, wobei der Berührungspunkt ebenfalls mit der Wanderwelle umläuft und somit der Kontakt zu jedem Zeitpunkt erhalten bleibt. Die Punkte der Kontaktfläche durchlaufen in der axial-tangentialen Ebene ebenfalls elliptische Trajektorien.

Aufgrund des Länge/Durchmesser-Verhältnisses eignet sich diese Bauform vorwiegend für kleine Durchmesser, also Motoren mit kleiner Leistung. Eingesetzt wird dieser Antrieb in Objektiven zur Fokussierung.

3.3 Motoren mit Dehnungswelle

Die dritte bekannte Bauform von Wanderwellenmotoren nutzt die Dehnungseigenformen eines Hohlzylinders. Während es sich bei den beiden zuvor erläuterten Bauformen um Verbundschwinger aus Piezokeramik und Metallkörpern handelt, besteht bei diesen Motoren der gesamte Stator aus Piezokeramik. Es können Motoren mit sehr kleinen Durchmessern (ab ca. 3 mm), als auch Motoren mit Durchmessern bis ca. 100 mm, vergleichbar der Bauform mit Biegewelle, realisiert werden [5]. Es sind auch Hohläufermotoren möglich.

Bild 10 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Motors mit Dehnungswelle. Der Stator in Form eines Piezokeramikzylinders mit Kreisringquerschnitt trägt an der oberen Stirnfläche eine Reibschicht. Zur Lagerung wird der Zylinder lose über das unten dargestellte Befestigungsteil gestülpt. Damit das Befestigungsteil die Schwingung nicht zu stark beeinflusst und um das Reaktionsmoment des Stators aufzunehmen, wird zwischen die beiden Teile eine elastische Schicht mit hohem Reibungskoeffizienten gebracht. In dem dargestellten Beispiel ist im Motor selbst keine Lagerung vorgesehen, da die Lagerung des Rotors (in Bild 10 oben) auch zusammen mit der Abtriebsachse erfolgen kann. Die Lagerung muß gleichzeitig die axiale Anpreßkraft zwischen Rotor und Stator und damit auch die Reaktionskraft zwischen Stator und Befestigungsteil aufbringen.

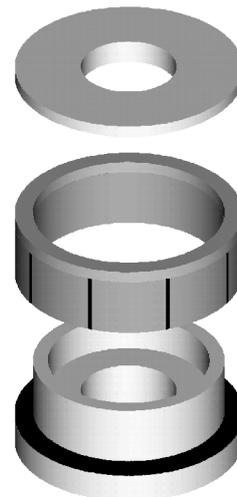


Bild 10: Prinzipieller Aufbau eines Motors mit Dehnungswelle

Die Erzeugung der wandernden Dehnungswelle erfolgt bei diesem konkreten Motor durch die Überlagerung von drei stehenden Wellen. Ähnlich wie bei einem Drehfeldmotor müssen drei, zeitlich um $\Phi_0 = 2\pi/3$ bzw. $\Phi_1 = 4\pi/3$ phasenverschobene Ansteuersignale bereitgestellt werden (Drei-Phasen-Ansteuerung). 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 der drei Ansteuersignale wird die Ausbreitungsrichtung der Wanderwelle und damit die Drehrichtung des Motors umgeschaltet. Eine Momentaufnahme der infolge der Überlagerung entstehenden wandernden Dehnungswelle enthält Bild 11. Die Oberflächenpunkte durchlaufen ebenfalls elliptische Trajektorien in der axial-tangentialen Ebene, wobei das Verhältnis von tangentialer zu axialer Auslenkung der Punkte bei der Dehnungswelle ungefähr 1,5 - 2,5 beträgt. Bei den anderen Motoren liegt dieses ungefähr zwischen 0,25 und 1, vergleiche auch Bild 5. Trotzdem erreichen alle Motorbauformen bei den zur Bewegungserzeugung maßgebenden tangentialen Auslenkungen ähnliche Größenordnungen zwischen 0,4 und 1,5 μm . Die axialen Amplituden sind beim Motor mit Dehnungswelle jedoch entsprechend kleiner.

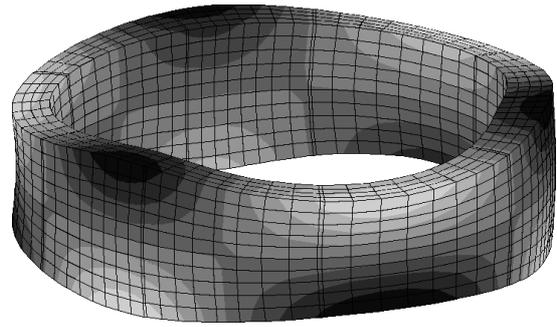


Bild 11: Momentaufnahme einer wandernden Dehnungswelle (stark überhöht)

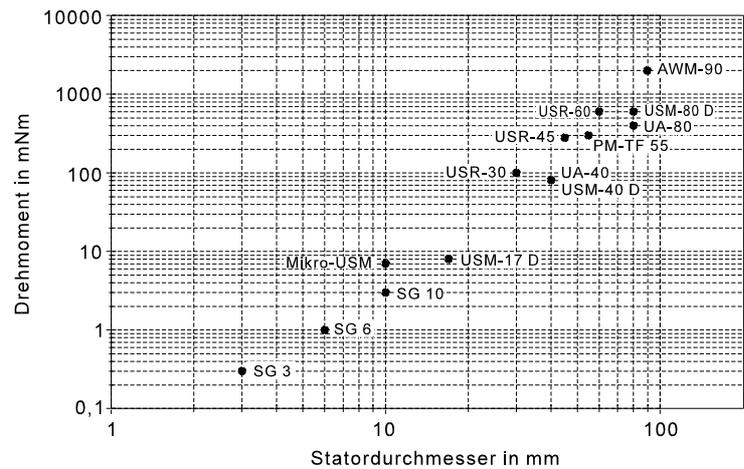


Bild 12: Drehmoment in Abhängigkeit des Statordurchmessers bei Wanderwellenmotoren
SG- und PM-Typen von PI Ceramic, UA von Canon, USM von Panasonic, UR von Shinsei

Eine Übersicht der realisierbaren Parameter kommerziell eingesetzter rotatorischer Wanderwellenmotoren zeigt Bild 12. Sie soll dem potentiellen Nutzer die Einordnung und den Vergleich zu klassischen Antriebslösungen ermöglichen.

3.4 Lineare Wanderwellenmotoren

Bisher wurden die verschiedenen Bauformen rotatorischer Wanderwellenmotoren besprochen. Das Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart (IKFF) untersucht seit Jahren Wanderwellenmotoren [2], [6], beschäftigt sich jedoch auch mit konventionellen Lineardirektantrieben [7]. Es war also naheliegend, die Möglichkeiten zur Umsetzung des Wanderwellenmotorprinzips auf lineare Bewegungen zu untersuchen. Im Rahmen einer am IKFF betriebenen Entwicklung eines linearen Wanderwellenmotors wurde dieses Prinzip auch für einen Lineardirektantrieb modifiziert, [8] bis [11]. 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 letztendlich zu einer stehenden Welle überlagern. Ein linearer Wanderwellenmotor benötigt deshalb ebenfalls einen geschlossenen Wellenleiter, auf dem die Wanderwelle umlaufen kann.

Das am IKFF realisierte Motorkonzept zeigt Bild 13. Der Linearmotor ist an die rotatorische Bauform mit umlaufender Biegewelle angelehnt. Der Ringstator besteht aus zwei geraden Abschnitten, die durch zwei Halbkreisbögen verbunden sind. Die Innenseite des unteren geraden

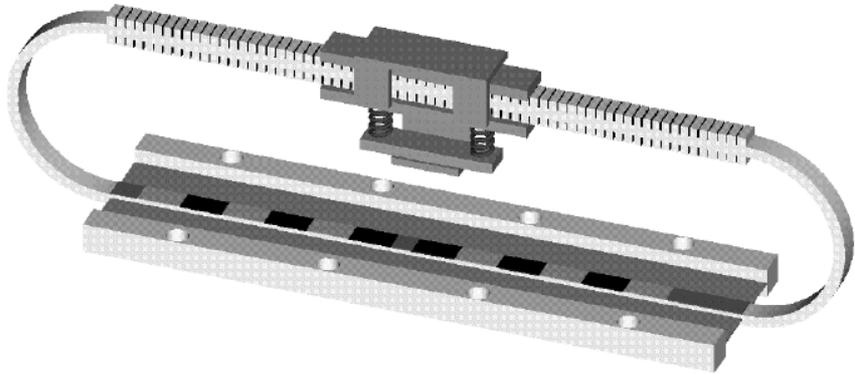
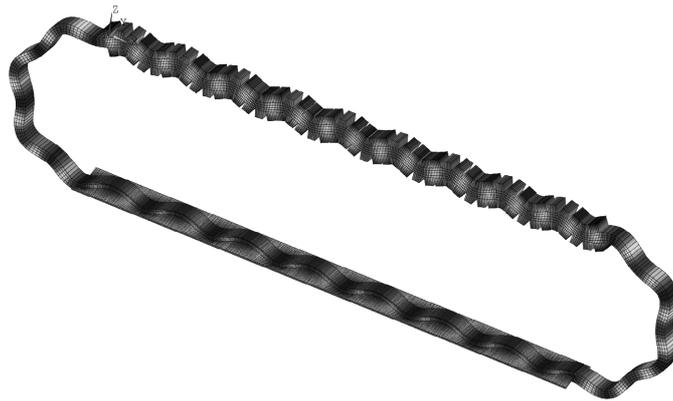


Bild 13: Linearer Wanderwellenmotor mit Ringstator [8]

Abschnittes trägt die Piezokeramikelemente zur Erzeugung der wandernden Biegewelle. Die Aufhängung des Stators erfolgt durch zwei Membranen entlang beider Seiten des unteren geraden Abschnittes, so daß der Ring im Raum ortsfest gebunden ist, die Wanderwelle jedoch ungestört im Wellenleiter umlaufen kann. Auf dem oberen geraden Abschnitt sitzt der Läufer (Bewegungsabgriff). Zur Vergrößerung der Bewegungskomponente in Antriebsrichtung trägt der obere gerade Abschnitt eine Zahnstruktur.

Die gewählte Anordnung besitzt einige Vorteile. Die geringe Läufermasse sichert eine hohe Dynamik. Der passive Läufer benötigt keine elektrischen Zuleitungen. Der Läufer kann umfangreich gestaltet werden, um eine Deformation des Ringstators durch die notwendige Anpressung des Läu-



Eigenform Nr. 97 zur Eigenfrequenz 50999.752 Hz

Bild 14: Momentaufnahme der wandernden Biegewelle im Ringstator des linearen Wanderwellenmotors (stark überhöht) [8]

fers zu vermeiden. Dies sichert auch einen gleichmäßigen Kontakt in der gesamten Berührfläche und durch die zwei Kontaktflächen eine höhere Motorkraft. Die Einspannung des Ringstators in Membranen erlaubt eine davon unabhängige, vergleichsweise einfache Gestaltung der Läuferführung.

Die wandernde Biegewelle entsteht hier wiederum durch Überlagerung zweier stehender Wellen, angeregt durch eine Zwei-Phasen-Ansteuerung unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Phasenbedingungen ($x_0 = \lambda/4$, $\Phi_0 = \pi/2$). Durch Vertauschen der beiden Ansteuersignale kann die Ausbreitungsrichtung und damit die Bewegungsrichtung des Läufers 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 rotatorischen Motoren nicht selbstverständlich. In [8] 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 Bild 14. Es wurden mehrere Prototypen des linearen Wanderwellenmotors mit Ringstator realisiert, welche die Funktionsweise dieses Motorkonzeptes in der Praxis demonstrieren, Bild 15.

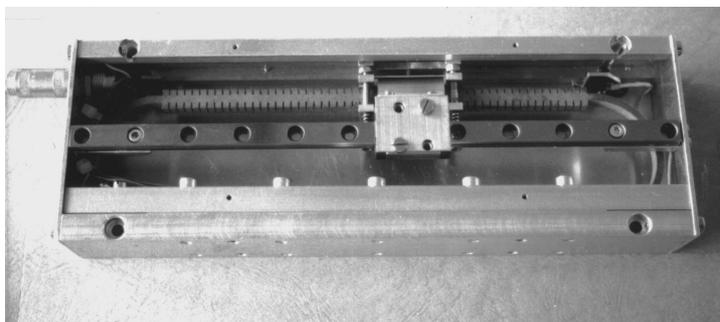


Bild 15: Prototyp einer Achse mit linearem Wanderwellenmotor

4. Zusammenfassung

Wanderwellenmotoren besitzen vielversprechende Eigenschaften. Als rotatorische Antriebe finden diese Motoren mittlerweile Anwendung auch in feinwerktechnischen Großserienprodukten, z.B. in Autofokus-Objektiven. Die Motivation, in Deutschland und Europa sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen, wurde zu Beginn vor allem von der Automobilindustrie getragen. Heute sind diese Antriebe insbesondere für feinwerktechnische Anwendungen von Interesse.

Erste Untersuchungen befaßten sich mit der Analyse der japanischen Motoren. Wobei die Erklärung der Funktionsweise und Untersuchung der Eigenschaften im Mittelpunkt

stand. Heutige Simulationstechniken verdeutlichen sehr anschaulich die Funktionsweise derartiger Motoren. Gekoppelte Feldberechnungen mit FEM ermöglichen, nun auch die Einflüsse der piezoelektrischen Schwingungserregung im Simulationsmodell zu berücksichtigen.

Mit diesen Werkzeugen wurden der Shinsei-Motor aber auch andere Wanderwellenmotoren am IKFF in den letzten Jahren untersucht, um eine Basis für das Vordringen in neue Anwendungsfelder zu schaffen, nämlich die Entwicklung von linearen Wanderwellenmotoren. Die Realisierung von linearen Direktantrieben nach dem Prinzip des Wanderwellenmotors könnte gerade für Antriebssysteme kleiner Baugröße mit geforderter Selbsthemmung eine interessante Alternative bieten, wenngleich lineare Wanderwellenmotoren noch weit von einer praktischen Nutzung entfernt sind.

5. Literatur

- 1 Glöß, R.: A High Resolution Piezo Walk Drive. Actuator 1994, Bremen 15.-17.06.94, Conference Proceedings, S. 200-203.
- 2 Frösche, A.: Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 10, 1992.
- 3 Canon Inc.: EF Objektive für EOS-Kameras. Firmenprospekt der Fa. Canon Euro-Photo GmbH, Willich 1996.
- 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 PI Ceramic: Piezoelektrischer Motor. DE 44 38 876 A1, 1995.
- 6 Herzog, B.: Entwicklungsgrundlagen für modulare Ultraschallantriebe - Meßtechnik, Regelungsprinzipien, Modelle. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 11, 1993.
- 7 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.
- 8 Hermann, M.: Entwicklung und Untersuchung piezoelektrisch erregter Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 14, 1998.
- 9 Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelektrische Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen, Tagung Innovative Kleinantriebe, Mainz 09./10. 05.96, VDI-Berichte 1269, S. 301-314.
- 10 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.
- 11 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.

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